

AD-A035 844

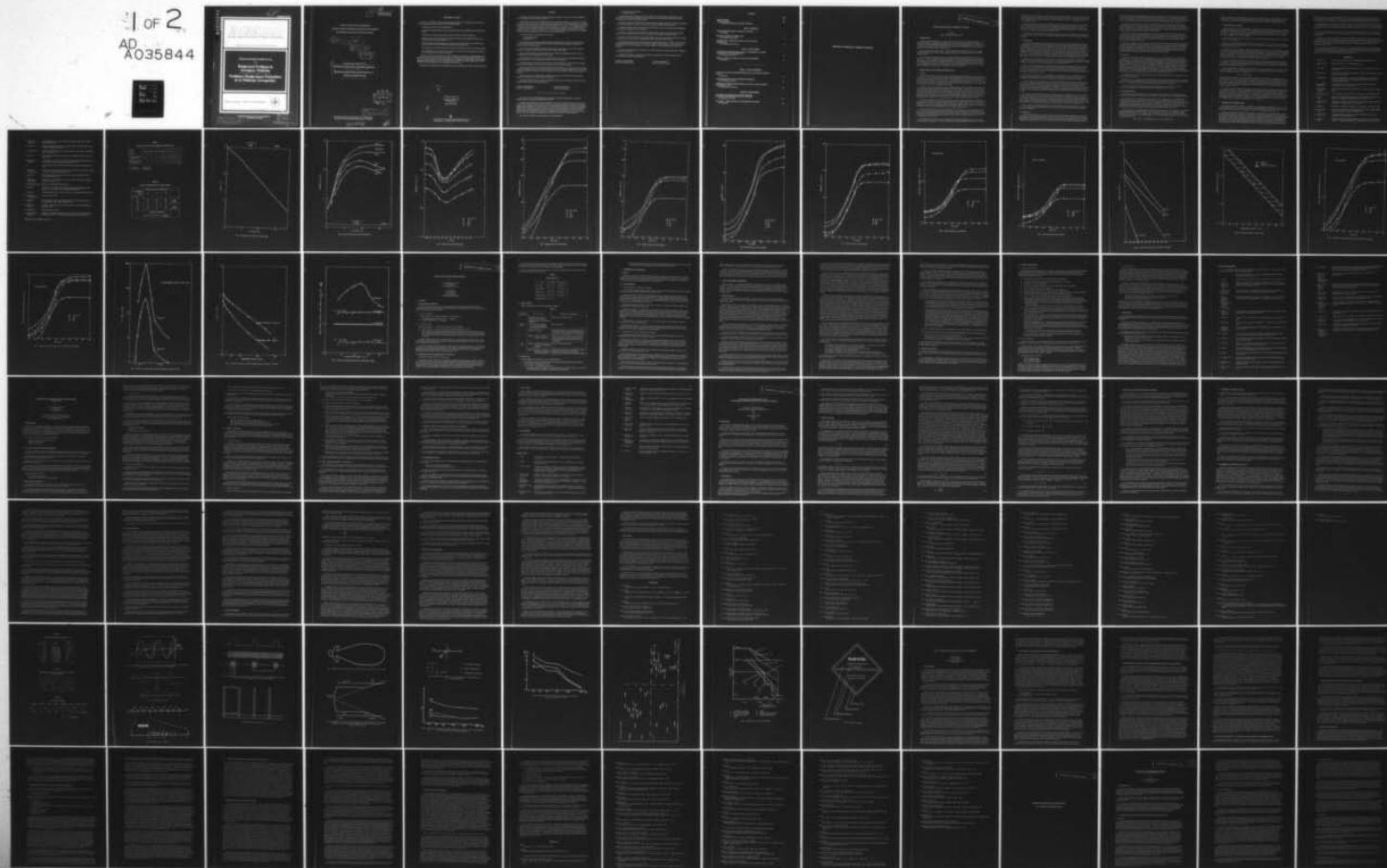
ADVISORY GROUP FOR AEROSPACE RESEARCH AND DEVELOPMENT--ETC F/6 6/18
BIOPHYSICAL PROBLEMS IN AEROSPACE MEDICINE (PROBLEMS BIOPHYSIQU--ETC(U)
DEC 76

UNCLASSIFIED

AGARD-AR-84

NL

1 OF 2
AD
A035844



AD A 035844

AGARD-AR-84

82

AGARD-AR-84

AGARD

ADVISORY GROUP FOR AEROSPACE RESEARCH & DEVELOPMENT

7 RUE ANCELLE 92200 NEUILLY SUR SEINE FRANCE

AGARD ADVISORY REPORT No. 84

on

Biophysical Problems in Aerospace Medicine

Problèmes Biophysiques Particuliers de la Médecine Aérospatiale

NORTH ATLANTIC TREATY ORGANIZATION



DISTRIBUTION AND AVAILABILITY
ON BACK COVER

DISTRIBUTION STATEMENT A

Approved for public release;
Distribution Unlimited

47 **RECORDED**
FEB 22 1977
RECEIVED
A

2

14

AGARD-AR-84

NORTH ATLANTIC TREATY ORGANIZATION
ADVISORY GROUP FOR AEROSPACE RESEARCH AND DEVELOPMENT
(ORGANISATION DU TRAITE DE L'ATLANTIQUE NORD)

9 Advisory Rept.

11 Dec 76

12 164 p.

6

AGARD Advisory Report No.84

BIOPHYSICAL PROBLEMS IN AEROSPACE MEDICINE
(PROBLEMES BIOPHYSIQUES PARTICULIERS DE LA
MEDECINE AEROSPATIALE).

DDC
RECEIVED
FEB 22 1977
A

DISTRIBUTION STATEMENT A

Approved for public release;
Distribution Unlimited

This Advisory Report was prepared by a Working Group
sponsored by the Aerospace Medical Panel of AGARD

400043

4B

THE MISSION OF AGARD

The mission of AGARD is to bring together the leading personalities of the NATO nations in the fields of science and technology relating to aerospace for the following purposes:

- Exchanging of scientific and technical information;
- Continuously stimulating advances in the aerospace sciences relevant to strengthening the common defence posture;
- Improving the co-operation among member nations in aerospace research and development;
- Providing scientific and technical advice and assistance to the North Atlantic Military Committee in the field of aerospace research and development;
- Rendering scientific and technical assistance, as requested, to other NATO bodies and to member nations in connection with research and development problems in the aerospace field;
- Providing assistance to member nations for the purpose of increasing their scientific and technical potential;
- Recommending effective ways for the member nations to use their research and development capabilities for the common benefit of the NATO community.

The highest authority within AGARD is the National Delegates Board consisting of officially appointed senior representatives from each member nation. The mission of AGARD is carried out through the Panels which are composed of experts appointed by the National Delegates, the Consultant and Exchange Program and the Aerospace Applications Studies Program. The results of AGARD work are reported to the member nations and the NATO Authorities through the AGARD series of publications of which this is one.

Participation in AGARD activities is by invitation only and is normally limited to citizens of the NATO nations.

Published December 1976

Copyright © AGARD 1976

All Rights Reserved

ISBN 92-835-0168-3



Set and printed by Technical Editing and Reproduction Ltd.
Harford House, 7-9 Charlotte Street, London, W1P 1HD

PREFACE

The Working Group on "Biophysical Problems in Aerospace Medicine" was set up by the Aerospace Medical Panel following the scientific meeting in Luchon (1971).

Shortly after the creation of this Working Group, its Chairman, Prof. Grandpierre, and its leader, Prof. Delahaye, expressed the belief that a number of problems should be given high priority: extraterrestrial radiation, the exposure of flying personnel to cosmic radiation, the use of lasers and radars in the Air Force. It was decided to review present knowledge in this particular field of radiation, with special emphasis on the primary concern of Medical Officers in the various Air Forces: flight safety and protection of flying and ground personnel. The authors of the various Reports do not claim to present an exhaustive survey of cosmic radiation, radar and laser problems. They highlight the main facts and state the positive aspects of some of the research undertaken.

This Advisory Report is divided into two main sections:

- extraterrestrial radiation;
- radars and lasers.

In the first section, the exposure of flying personnel to cosmic radiation is the subject of three Reports by scientific experts whose services were enlisted by the Anglo-French authorities during the development of the Concorde supersonic transport aircraft.

Dr Fuller, a physicist at AWRE, Aldermaston (UK), has had extensive experience in the field of cosmic ray dosimetry. He indicates the doses received according to the various altitude bands.

Professor Delahaye (FAF) and Professor Pfister (Faculty of Medicine, Necker Hospital) analyse the various biological studies of cosmic radiation which have been made.

Professor Delahaye (FAF) and Group Capt. D. Sturrock (RAF, Retired) discuss the radiobiological problems of flights at altitudes below 25 km, and state that the risks involved are still very low.

The Working Group felt it would be useful to review the latest developments in radars and lasers, with which Medical Officers responsible for the protection of personnel at air bases are also concerned.

Médecin Principal Servantie, of the Biological Research and Development Centre of the French Navy in Toulon, who has been engaged for many years in the study of radar waves, is the author of the paper on this now universally used means of detection, the power levels and transmission modes of which often raise difficulties in the matter of protection.

Lt Col. Schwarzer, of the Federal German Armed Forces, reports on the effects of lasers and discusses the standards to be applied and the safety measures to be adopted.

This Advisory Report, which is the result of collaboration between doctors and physicists, will be an extremely valuable document for all Air Force Medical Officers.

Professor R. GRANDPIERRE
Chairman of Working Group

Professor R. P. DELAHAYE
Leader of Working Group

Le Groupe de Travail "Problèmes Biophysiques Particuliers de la Médecine Aéronautique" a été créé par l'ASMP à la suite de la réunion scientifique de Luchon (1971).

Très rapidement, le Président, le Professeur Grandpierre et le Leader, le Professeur Delahaye, ont estimé qu'un certain nombre de problèmes devait être traité en priorité: rayonnements extraterrestres et irradiation du Personnel navigant; lasers et radars dans les Armées de l'Air. Il a été décidé de rédiger des mises au point sur les connaissances actuelles de ces rayonnements en centrant les études sur la préoccupation fondamentale des médecins des différentes armées de l'Air: la sécurité des vols et la protection du personnel qu'il soit navigant en vol ou technicien au sol. Les différents rapports ne prétendent pas réunir des connaissances exhaustives sur les rayonnements cosmiques, les radars, les lasers. Ils soulignent les faits principaux et affirment le côté positif de certaines recherches.

Dans ce rapport de synthèse, deux grandes parties sont individualisables:

- les rayonnements extraterrestres;
- les radars et les lasers.

Dans la première partie, l'irradiation du personnel navigant due aux rayonnements cosmiques fait l'objet de trois rapports de personnalités scientifiques dont les compétences ont été mises à profit par les autorités franco-britanniques dans la mise au point du TSS Concorde.

Le Dr Fuller, physicien à l'AWRE, Aldermaston (UK), possède une grande expérience des problèmes de dosimétrie du rayonnement cosmique. Il a précisé les doses reçues en fonction de plusieurs tranches d'altitude.

Le Professeur Delahaye (FAF) et le Professeur Pfister (CHU Necker) analysent les différentes études biologiques des rayonnements cosmiques qui ont été entreprises.

Le Professeur Delahaye (FAF) et le Group Capt. D.Sturrock (RAF) discutent des problèmes radiobiologiques posés par les vols à des altitudes inférieures à 25 km et affirment que les risques demeurent très faibles.

Etant donné les autres préoccupations des médecins chargés de la protection du personnel dans les bases aériennes, le Groupe de travail a estimé nécessaire la publication des mises au point sur le radar et le laser.

Le Médecin Principal Servantie, du Centre d'Etudes et de Recherches biologiques de la Marine (Toulon) spécialisé depuis de nombreuses années dans l'étude des ondes radar, a rédigé le chapitre concernant ce moyen de détection universellement utilisé et dont les puissances, et les modes d'émission posent des problèmes souvent difficiles de protection.

Le Lieutenant-Colonel Schwarzer de la Bundeswehr a précisé les effets du laser et discuté des normes à appliquer et des systèmes de protection.

Ce travail de synthèse dû à la collaboration de médecins et de physiciens, rendra les plus grands services à tous les médecins des différentes bases aériennes.

Le Professeur GRANDPIERRE
Président du Groupe de Travail

Le Professeur DELAHAYE
Leader du Groupe de Travail

CONTENTS

	Page
PREFACE (English)	iii
FREPACE (Français)	iii
by Professor R.Grandpierre and Professor R.P.Delahaye	

PART I: RADIATION

COSMIC RADIATION DOSES AT AIRCRAFT ALTITUDES	
by E.W.Fuller	3
BIOLOGICAL STUDIES OF COSMIC RAYS	
by R.P.Delahaye and A.Pfister	27
RADIOBIOLOGICAL PROBLEMS OF HIGH ALTITUDE FLIGHTS	
(BELOW 25 km)	
by R.P.Delahaye and D.Sturrock	37

PART II: RADAR/LASERS

NON-IONISING ELECTROMAGNETIC FIELDS. ENVIRONMENTAL FACTORS	
IN RELATION TO MILITARY PERSONNEL	
by B.Servantie and P.E.Tyler	45
MEDICAL ASPECTS OF LASERS AND LASER SAFETY PROBLEMS	
by W.Schwarzer	75

PARTIE I: LES RAYONNEMENTS

DOSES DUES AUX RAYONNEMENTS COSMIQUES AUX ALTITUDES INFÉRIEURES	
A 25 km	
par E.W.Fuller	93
ETUDES BIOLOGIQUES DES RAYONNEMENTS COSMIQUES	
par R.P.Delahaye et A.Pfister	115
PROBLEMES RADIOBIOLOGIQUES POSES PAR LES VOLS A HAUTE ALTITUDE	
(INFÉRIEURE A 25 km)	
par R.P.Delahaye et D.Sturrock	125

PARTIE II: RADAR/LASERS

LES CHAMPS ELECTROMAGNETIQUES NON-IONISANTS.	
FACTEURS D'ENVIRONNEMENT EN MILIEU MILITAIRE	
par B.Servantie et P.E.Tyler	131
LES LASERS – ASPECTS MEDICAUX ET PROBLEMES DE SECURITE	
par B.Schwarzer	155

BIOPHYSICAL PROBLEMS IN AEROSPACE MEDICINE

COSMIC RADIATION DOSES AT AIRCRAFT ALTITUDES

by

E.W.Fuller

A.W.R.E., Aldermaston, Berkshire, UK

1. INTRODUCTION

The general physical characteristics of cosmic radiation were well reviewed for AGARD by Allkofer¹ in 1971. That paper described the composition and energy spectra of the primary radiation and how this radiation was modulated by transmission through the atmosphere and by interaction with the magnetic fields associated with the sun and the earth. The present paper will be mainly concerned with the radiological doses associated with this radiation in the altitude bands used by military aircraft.

Three altitude bands have been studied — 35,000 to 40,000 ft (200 g/cm²) used by subsonic jets, 50,000–55,000 ft (100 g/cm²) for supersonic aircraft operating at about Mach 2 and 85,000 ft (20 g/cm²) for aircraft operating at Mach 3.

It will be seen that the greater part of the dose arises from lightly ionising radiation and from neutrons of energy up to a few MeV. For these radiations the procedures for converting the data from flux measurements to dose estimates are well established in principle (e.g. Reference 2). However, a small part of the dose arises from nuclear interactions in tissue and, at the highest altitude, there is still a detectable flux of densely ionising heavy ions. The biological effects from these two components may well be qualitatively different from those of lightly ionising radiations and neutrons hence it is necessary to consider them separately.

2. DOSES FROM GALACTIC COSMIC RADIATION (GCR)

2.1 Ionisation

The ionisation produced by GCR (cosmic radiation originating from outside the solar system) has been extensively studied for many years in particular by Neher and his collaborators^{3,4}. These studies have established how the ionisation rate varies with time, latitude and altitude. The temporal variation is due to the variation in the sun's magnetic field and so follows the 11 year solar cycle; lower energy radiation can penetrate to the earth's orbit when the sun's magnetic field is low. Similarly the earth's magnetic field produces the latitude effect; lower energy radiation being able to reach points of high geomagnetic latitude.

Interaction with the earth's atmosphere produces both attenuation of the primary radiation and generation of secondary radiation which is subsequently absorbed deeper in the atmosphere. If the spectrum contains sufficient low energy particles (high latitudes at solar minimum) the net effect will be a continuous reduction of ionisation with decreasing altitudes. On the other hand, if the magnetic effects have already removed the low energy radiation, the ionisation rate will initially increase as the altitude decreases typically to depths of the order of 100 g/cm²: [Altitude effects are determined by the amount of material the radiation has traversed rather than altitude as such. The relation between altitude and overlying mass/unit area for a standard atmosphere is shown in Figure 1].

The bulk of measurements of ionisation at altitudes up to 20 g/cm² have been carried out with argon filled ionisation chambers which are calibrated on the ground using known γ radiation fields. These can be converted into absorbed dose rate assuming the relations between stopping powers and energy required to form an ion pair for argon and air are the same for the ionising component of the cosmic radiation as for γ radiation. The absorbed dose rate in tissue is taken to be 14% greater than that in air for lightly ionising radiation.

Comparison of the results obtained by different groups of workers⁵ has shown that those obtained by Neher's group are about 20% greater than those obtained by a number of other groups that are in substantial agreement. In view of this Neher's results have been used to determine the variation of ionisation dose rates with time, altitude and latitude but the absolute values have been adjusted to agree with a mean sea level ionisation rate at 45°N of 2.14 ion pairs cm⁻³ sec⁻¹ (Refs. 6, 7).

The results obtained are shown in Figure 2 (variation with altitude at high latitude for solar minimum and maximum), Figure 3 (variation over a solar cycle at high latitude for selected altitudes) and Figures 4 and 5 (variation

with latitude for selected altitudes for solar minimum and solar maximum respectively). These curves apply to doses in small isolated volumes of tissue or, in practice, to doses in extremities. However, as this component of the dose varies comparatively slowly with depth, except for the highest altitudes, they are also a reasonable measure of the dose throughout the body.

These curves show that over the range of altitudes of interest the dose rate varies little between 60° and 90° geomagnetic latitude and that the change from this (maximum) value to the magnetic equator varies between a factor of 6 (high altitude, solar minimum) and 2.5 (low altitude) depending on the altitude and the phase of the solar cycle. The variation over the solar cycle is greatest at high altitudes and latitudes and is then about a factor of 1.8; there is much less variation with time near the equator.

At solar maximum, high latitude, the maximum rate from this component is about $400 \mu\text{rad/h}$ which occurs in the 50 g/cm^2 band. At solar minimum the rate increases continuously with increasing altitude reaching $750 \mu\text{rad/h}$ at 20 g/cm^2 .

2.2 Neutron Doses

No neutrons are present in the primary galactic radiation; they are all generated through nuclear interactions of this radiation with the matter through which they pass. This results initially in neutrons in two energy groups: very high energy neutrons which carry off a substantial fraction of the energy of the primary particles and lower energy 'evaporation' neutrons which are emitted with an energy of the order of 1 MeV. The high energy group can themselves initiate nuclear reactions producing more neutrons in both groups; the low energy group is further degraded in energy through collision with air nuclei. The resulting spectrum covers a very wide energy range (10^{-8} to 10^3 MeV). Several calculations have been made of the neutron spectrum generated by cosmic rays in the atmosphere, the earlier ones (e.g. Reference 8) indicating that 80% of the dose was contributed by neutrons of energy less than 10 MeV. More recent calculations^{9,10} show that nearly half the dose comes from higher energy neutrons.

Systematic information on the variation of neutron dose with time, altitude and latitude can be obtained from a number of studies of the dependence of the atmospheric neutron flux on these parameters undertaken by a number of groups of cosmic ray physicists during the present and previous solar cycle^{11,12,13,14}.

Merker et al.¹⁴ have compared their results with those of a number of other workers and generally find agreement to within 20%. Similar agreement is found with theoretical calculations⁹ of flux distributions. However, in view of the wide energy spread of the spectrum and the sensitivity of flux to dose conversion to the energy, the theoretical calculations have only been used to determine the variation of neutron dose; the absolute value has been set from direct measurement at one point.

Two independent measurements^{15,16} are available for the neutron dose rate at about 65,000 ft above Fort Churchill at the time of the Solar minimum between the 19th and 20th cycles (1965). One, Reference 15, was made with a detector designed to measure dose equivalent rate for neutrons of all energies up to 14 MeV.

The other, Reference 16, was made with nuclear emulsions and measured the dose and dose equivalent from recoil protons with energy less than 20 MeV so sets a lower limit to the neutron dose. Both measurements gave a result of $500 \mu\text{rem/h}$ for the 'low energy' neutron dose equivalent rate. The quality factor derived from the emulsion measurements shows this rate corresponds to 0.19 mrad/h . This is the rate due essentially to recoil protons of energy less than 20 MeV in an isolated small volume of tissue. It is argued below that most of the dose from neutrons of energy much higher than 20 MeV is contributed through nuclear reactions and is thus recorded in the star dose.

The distinction between small and large volume irradiation is much more important in the case of the neutron component than in that of the ionising component. The dose produced by a given flux of neutrons in a small isolated volume (extremity) is about twice the average dose produced in a 30 cm diameter sphere by the same flux. As is common in radiological protection practice, the larger dose resulting from considering a small volume has been used to construct the curves given in Figures 2, 6, and 7 which show the variation in neutron absorbed dose rate with altitude (Figure 2) and with latitude for minimum and maximum phases of the solar cycle (Figures 6 and 7).

These curves show a similar latitude dependence to that exhibited by the ionising radiation but, as expected from the way the neutrons are generated, there is always a build up of neutrons from the top of the atmosphere down to about 100 g/cm^2 .

2.3 Nuclear Stars

The nuclear collisions which produce the neutrons discussed above also produce charged particles; carbon and lighter nuclei in the case of collisions with tissue. These particles commonly have a high ionisation density along their tracks (compared with the primary cosmic radiation) and, especially as several originate at one point, produce a high density of energy transfer (i.e. a high local dose) at that point. For this reason it is advisable to be able to

consider this component of dose separately rather than to treat it simply as part of the ionising and neutron component. As pointed out above, the initiating particle may be a high energy neutron; if the star dose is considered separately this component of the *neutron* dose should not be included in the 'neutron dose' discussed in the previous section. That is the reason neutron dose estimates restricted to neutrons below about 20 MeV were used there.

Nuclear stars are most commonly observed in nuclear emulsions; unfortunately these contain high Z nuclei (Ag and Br) which are quite unlike tissue nuclei and most of the reactions occur in those nuclei. By loading the emulsion with glycerol¹⁷ or by varying the gelatine to silver halide ratio¹⁵ it is possible to determine statistically the numbers of stars with a given number of prongs occurring in each type of material. Such measurements were made at about 65,000 ft at Fort Churchill at the 1964/5 solar minimum.

Shen¹⁸ gives a series of curves showing variation of tissue star frequency with altitudes and latitudes based on cloud chamber measurements at mountain altitudes and a theoretical treatment due to Lingenfelter. The value deduced from these curves for the Fort Churchill measurements agrees within 20% with those observed and so they have been used to construct Figures 8 and 9 which show the star frequency as a function of latitude at various altitudes for solar minimum and maximum.

The quantity of radiological concern associated with the star is the amount of energy deposited 'locally' at high LET (linear energy transfer – usually expressed in keV/ μ or MeV/g/cm²). Although this concept is rather vague, consideration of the range of the high LET products that may be produced sets a limit of the order of 50 MeV per star on it. Adopting this value results in the factor (1 star/g/h produces 0.8 μ rad/h) for converting star frequency to absorbed dose rates. The 'star' dose rate is then seen to be about 5% of the ionisation dose rate; however, as discussed below, the relative biological effect may be much greater than this implies.

2.4 Heavy Ions

About 1.5% of the particles in the primary radiation have $Z > 2$, virtually all have $Z < 28$, most of this 'heavy group' have Z between 6 and 9. The energy spectra, if expressed in terms of MeV/nucleon, have similar shape for all charges, hence, as the rate of energy loss varies approximately as Z^2 , the relative number of heavy ions decreases rapidly as the radiation penetrates the atmosphere. Nevertheless, they are still detectable at altitudes greater than 50,000 ft. Heavy ion tracks have two distinguishing features. (1) The minimum rate of energy loss is proportional to Z^2 , hence these heavy ions have long regions of track where the LET is larger than that reached by protons at the end of their range, e.g. a high energy neon ion ($Z = 10$) has 1,000 μ of track where the LET is greater than 100 keV/ μ , the corresponding proton track length is 10 μ , and (2) The maximum rate of energy loss, reached near the end of the track, also varies as Z^2 and so the LET reaches values never attained by lighter particles; e.g. the LET for a neon ion is greater than 1,500 keV/ μ 20 μ from the end of its track.

It is possible that both of these features may lead to effects not observed with lower LET radiation hence the special interest in these particles.

Figures 10 and 11 are adapted from a report by Allkofer¹⁹ and show the results obtained by his own group and those of Webber. Figure 10 shows how the flux of heavy ions varies with altitudes, Figure 11 shows the density of 'enders' – i.e. the number of very heavily ionised regions corresponding to the end of the track.

It may be noted that the absorbed dose rates associated with these heavy ion enders is very small e.g. 3×10^{-2} enders/cm³/h with $Z = 10$ would deposit less than 30 MeV/g/h or about 0.5 μ rad/h.

2.5 Dose Equivalent Rates

The absorbed dose rates discussed above can be converted into dose equivalent rates using the relationship between LET and Quality Factor recommended by the ICRP²⁰ for delayed effects if the LET distribution is known.

[Dose Equivalent (rem) = Absorbed Dose (rad) \times Quality Factor.] Information on the LET distribution is available from the theoretical calculations²¹ which show that most of the primary radiation has low LET (QF = 1), the high LET component arising from charged nuclear collision fragments and neutrons. Measurements with nuclear emulsions¹⁶ show the Quality Factor of the low energy (< 20 MeV) part of the neutron spectrum is 2.6. The experimental data on nuclear stars is still sparse, emulsion measurements at 65,000 ft at Fort Churchill^{15,17} giving a dose equivalent rate from this component of about 0.4 mrem/h (0.05 mrad/h with a QF of 8).

These data lead to a QF at high latitudes and altitudes and solar minimum of 1.74. This value is in remarkable agreement with the values obtained by Cowan et al.²² using a Rossi spectrometer²³ in aircraft flights at 38,000, 50,000 and 60,000 ft during 1971. This suggests that the high LET components in the nuclear stars effectively increase the QF of the whole of the ionising component to 1.5. Then the total dose equivalent rate may be obtained by applying the expression

$$\text{Total DE Rate} = (\text{Ionisation Rate} \times 1.5) + (\text{Neutron Rate} \times 2.6)$$

The dose equivalent rates obtained in this way at solar minimum and maximum are shown in Figures 12 and 13. These rates do *not* include the contribution from heavy ions and they include the assumption that the dose equivalent from nuclear stars may be calculated in the same way as that used for single high LET tracks.

3. SOLAR COSMIC RAYS (SCR)

Solar Cosmic Rays are emitted from the sun in association with some of the largest Solar Flares. Most of the particles reaching the earth are protons so the events giving rise to SCR are termed Solar Proton Events (SPE). The frequency of SPE follows the 11 year solar cycle but in the active years they appear to occur at random. They also vary greatly in size (number of protons emitted), duration and energy spectrum. However, they are all much less energetic than the Galactic Radiation.

Data on the 19th solar cycle (1954–65) have been reviewed by McDonald²⁴ and Shen²⁵, those of the 20th cycle up to 1971 by Atwell²⁶.

Some of the largest events would have given rise to very large doses in space; hence there is great interest in the implications of these events for space travel and so the sun has been continuously monitored by satellite borne detectors for several years.

However, as the events are irregular, virtually unpredictable and short lived (typically a few hours) it has been extremely difficult to make measurements on them at aircraft altitudes. Hence most of our present knowledge of the dose rates these events produce at aircraft altitudes is obtained from calculated transmission of the radiation through the atmosphere^{27,28}. The solar flares frequently disturb the earth's magnetic field so the solar protons may reach regions which would normally be magnetically protected from them. However, the calculations generally neglect magnetic cut off and so give the maximum dose rates produced.

As the primary protons in the SCR are of such low energy (compared with GCR) the secondary neutrons they produce are much more penetrating than the protons themselves. Hence at the depths in the atmosphere considered here the dose equivalent from neutrons is always a significant part of the total and at depths greater than 100 g/cm² is generally the major part²⁷.

Fuller and Simon²⁹ have calculated the DE rates produced at 100 g/cm² by SPE of the 19th Solar cycle and those of the 20th up to 1971 assuming that all events had an exponential rigidity spectrum, i.e. the flux of protons with rigidity greater than P is given by

$$N = N_0 \exp(-P/P_0).$$

N_0 , the total flux of protons and P_0 , the characteristic rigidity can be determined from measurements of the number of protons above two energy levels. Their results for the 19th cycle have been extended to give the dose rates at 20 g/cm² also and are given in Table I. The present (20th) cycle has been one of low activity except for a period in August 1972 when two large events occurred. The DE rate profiles at 20 and 100 g/cm² for the larger of these two obtained by applying the calculational method of Reference 29 to data from satellite borne probes³⁰ are given in Figure 14.

The variation of dose or DE rate with altitude can be calculated for events for which detailed information on the spectra is available; a number of such studies have been carried out for the giant flare of February 1956. The variation of peak dose rate with altitude for this event obtained by Armstrong³¹ is shown in Figure 15. Generally, however, detailed spectral information is not obtained and it is then necessary to fit the two or three measurements available to an assumed spectral law. If the exponential rigidity law is used it turns out that for altitudes between 60 and 200 g/cm² the reduction in DE rate with decreasing altitude does not depend greatly on the rigidity index²⁹, but between 20 and 60 g/cm² it does (Figure 16).

4. OPERATIONAL CONSIDERATIONS

The maximum annual dose proposed by the ICRP²⁰ for occupationally exposed personnel is 5 rem/y. For others (assuming they do not constitute a large part of the whole population) it is 0.5 rem/y. We may consider that flying crew could be treated as 'occupationally exposed' but the average passenger could not.

The data in the preceding sections have been presented as dose and DE rate/h. Generally flights are undertaken to transport personnel or material from point to point or to survey a particular path so we are actually more concerned with the DE incurred in a journey. The distinction is important in comparing the radiological consequences of operating in the three different altitude bands considered as the three bands are used by aircraft operating at different speeds. Table II gives the dose equivalent and number of heavy ion ends/cm³ per 10,000 miles at 20, 100 and 200 g/cm² over high latitude, mid latitude and equatorial routes from GCR assuming aircraft operating in these bands travel at 1,800, 1,200 and 600 mph respectively. It can be seen that the DE is always small and that

the journey doses decrease with increasing altitude. On the other hand the numbers of heavy ion interactions increases rapidly with increasing altitude. This increase would balance the dose 'saving' achieved at 20 g/cm² if the heavy ions were about 1,000 times more damaging (for a given energy deposition) than the remaining radiation.

Although the Solar Cosmic Rays can give rise to rates that are very large compared with the rates from Galactic radiation the probability of encountering such an event, averaged over the 11 year cycle, is so low that the average dose from SCR is always small compared with GCR — especially as the SCR will not affect regions with high magnetic cut off.

If one considers the worst year of the 19th cycle the average SCR rate was about 0.75 mrem/h at 100 g/cm² and 5 mrem/h at 20 g/cm². Hence, averaged over single years the dose from SCR could be considerably larger than that from GCR.

Consideration of the effect of GCR is complicated by the possibility of taking evasive action. Such action is proposed for commercial SST's which may descend to the top of the subsonic band without greatly reducing velocity. Hence the DE from encounter with an SPE can be reduced by about a factor of 4; in fact the DE would then be less than that suffered by a subsonic aircraft covering the same route. The penalty suffered for this manoeuvre is increased fuel consumption.

In view of the very low probability of occurrence of events delivering DE approaching the annual maximum for aircraft operating at 100 g/cm² this may be considered an acceptable risk for military aircraft. Considerably higher dose rates would be encountered at greater frequency in aircraft operating at 20 g/cm² and this may require the development of an evasion procedure if this band becomes widely used.

REFERENCES

1. Allkofer, O.C. *Present Knowledge on Cosmic Rays*. AGARD-CP-95, Part III, March 1972.
2. Attix, F.H. (ed.) *Radiation Dosimetry*, Vol.1. Academic Press, 1968.
et al.
3. Neher, H.V. *Cosmic Rays that Changed from 1954 to 1958 to 1965*. J. Geophys. Res., Vol.72, p.1527, 1967.
4. Neher, H.H. *Cosmic Rays at High Latitudes and Altitudes Covering Four Solar Maxima*. J. Geophys. Res., Vol.76, p.1637, 1971.
5. Carmichael, H. *Comments on the Absolute Ionisation of Cosmic Radiation at Balloon Altitudes Covering Four Solar Maxima*. 12th International Conference on Cosmic Rays (Proceedings), MOD-67, 1971.
6. Shamos, M.H. *A New Measurement of the Intensity of Cosmic Ray Ionisation at Sea Level*.
Liboff, A.R. J. Geophys. Res., Vol.71, p.4651, 1966.
7. Lowder, W.M. *Cosmic Ray Ionisation in the Lower Atmosphere*. J. Geophys. Res., Vol.71, p.4661,
Beck, H.L. 1966.
8. Lingonfelter, R.E. *The Cosmic Ray Neutron Leakage Flux*. J. Geophys. Res., Vol.68, p.5633, 1963.
9. Light, E.S. *The Time Dependent World Wide Distribution of Atmospheric Neutrons and their
et al. Products*. 2: Calculation, J. Geophys. Res., Vol.78, p.2741, 1973.
10. Armstrong, T.W. *Calculations of Neutron Flux Spectra Induced in the Earth's Atmosphere by Galactic
et al. Cosmic Rays*. J. Geophys. Res., Vol.78, p.2715, 1973.
11. Haymes, C. *Fast Neutrons in the Earth's Atmosphere*. J. Geophys. Res., Vol.69, p.841, 1964.
12. Greenhill, J.G. *Solar Cycle Variations in the Polar Atmospheric Neutron Flux at Balloon Altitudes*.
et al. 12th Int. Conf. on Cosmic Rays. Paper MOD 62, 1971.
13. Jenkins, R.W. *Latitude and Altitude Dependence of the Cosmic Ray Albedo Neutron Flux*.
et al. J. Geophys. Res., Vol.75, p.4197, 1970.
14. Merker, M. *The Time Dependent World Wide Distribution of Atmospheric Neutrons and their
et al. Products*. 1: Fast neutron observations. J. Geophys. Res., Vol.78, p.2727, 1973.

15. Fuller, E.W.
Clarke, N.T. *The Radiological Dose to the SST Concorde from Galactic Cosmic Rays.* AWRE report 0-64/68, 1968.
16. Schaefer, H.J. *Radiation Measurement at Supersonic Transport Altitude with Balloon Borne Nuclear Emulsions.* NAMI 1068, May 1969.
17. Davidson, P.J.N. *Radiation Dose Rate at Super Sonic Transport Altitudes.* Final report on MOA Grant P D 134/017 RAE, 1967
18. Shen, S.P. *Space Radiation and the Supersonic Transport.* R 64 SDI Space Science Lab., GEC, January 1964.
19. Allkofer, O.C.
Heinrich, W. *Untersuchung über die schweren Kerne der kosmischen Strahlung in Hohenbereich des Überschallfluges.* Christian-Albrechts-Universität, Kiel, 1973.
20. — *International Commission on Radiological Protection.* Publication 9, Pergamon Press, 1966.
21. O'Brien, K.
McLaughlin, J.E. *Calculation of Dose and Dose Equivalent Rates to Man in the Atmosphere from Galactic Cosmic Rays.* USAEC report HASL 228, 1970.
22. Cowan, F.P.
et al. *Direct Measurement of Dose Equivalent Rates in Aircraft.* Brookhaven National Laboratory, BNL 17060, 1972.
23. Rossi, H.H.
Rosenzweig, W. *Measurement of Neutron Doses as a Function of Linear Energy Transfer.* Radiation Research, Vol.2, p.417, 1955.
24. McDonald, F.B. (ed) *Solar Proton Manual,* NASA TR R169, 1963.
25. Steele, H.L. *SST Hazards — Penetrating Cosmic Radiation and Non-Penetrating Radiation from Radioactive Debris.* Boeing Company Report D6A10424-2, 1967.
26. Atwell, W. *The Significant Solar Proton Events of the 20th Cycle.* NASA TM X-2440 329, 1972.
27. Flamm, E.J.
Lingonfelter, R.E. Science 144, p.1566, 1964.
28. Foelsche, T.
et al. *Dose Response Functions in the Atmosphere due to Incident High Energy Protons with Applications to SPE.* NASA TN D-6010, 1970.
29. Fuller, E.W.
Simon, P. *Frequency of Solar Proton Events at Concorde Altitudes.* Concorde Aero Medical Group Paper, 1972.
30. McKinnon, J.A. Private Communication, 1972.
31. Armstrong, T.W.
Moran, H.S. *Calculation of the Radiation Hazard at Supersonic Aircraft Altitudes Produced by an Energetic Solar Flare — II.* Nuclear Science & Engineering, Vol.42, p.41, 1970.

TABLE I

Number of SPE in 19th Cycle Exceeding Selected DE Rate Levels

DE rate R m rem/h	2,000	1,000	500	200	100	50	20	10	5	2	1
Number exceeding R at 20 g/cm ²	1**	3	4	9	10	12	19	24	26	31	35
Number exceeding R at 100 g/cm ²				1*	1	2	4	9	13	17	24

* 23 Feb. '56 500 m rem/h

** 23 Feb. '56 2,400 m rem/h

TABLE II

Doses for 10,000 Mile Journey at Various Altitudes

Atmospheric Depth g/cm ² Latitude	Dose Equivalent (mrem/10,000 miles)			
	20	100	200	
75	8.8	11.5	12.8	Solar Minimum
40	3.5	6.6	8.7	
10	1.1	2.3	3.6	
75	4.6	7.1	8.9	Solar Maximum
40	2.7	4.4	7.4	
10	0.9	2.1	3.4	
	Enders/cm ³ /10,000 miles			
	4.5×10^{-1}	8.3×10^{-3}	Not Measured	

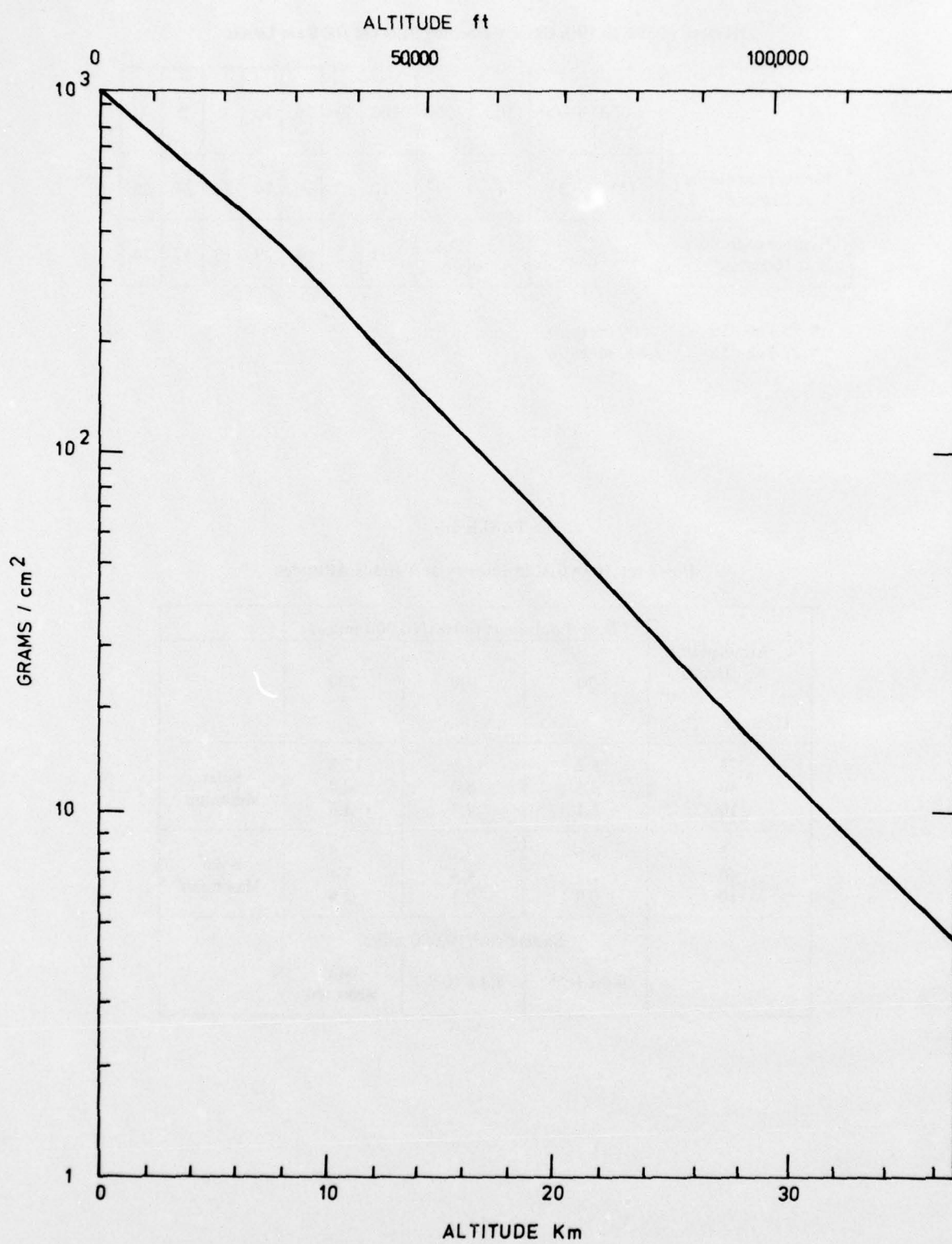


Fig.1 Relation between altitude and overlying weight

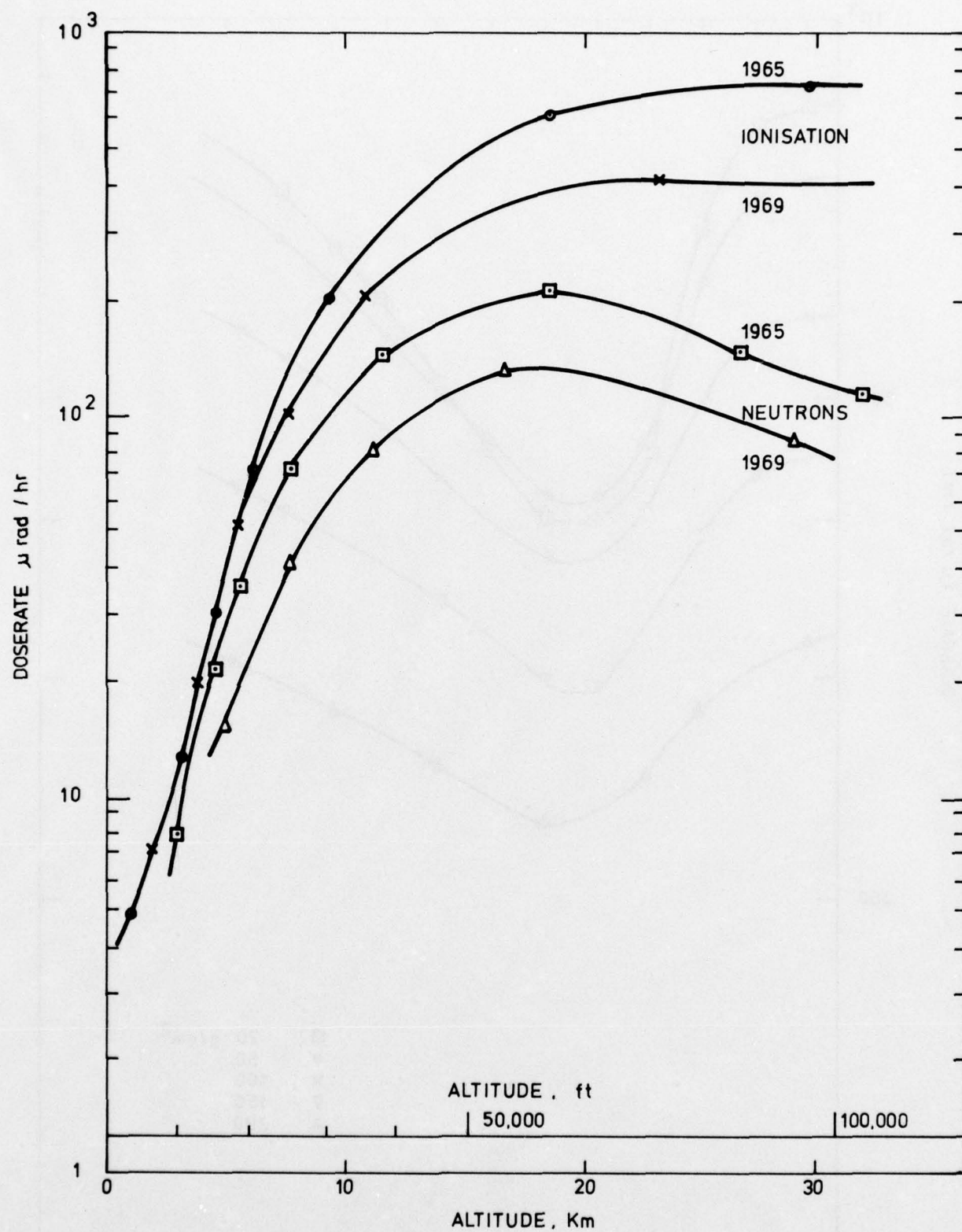


Fig.2 Dose rate variation with altitude (high latitude)

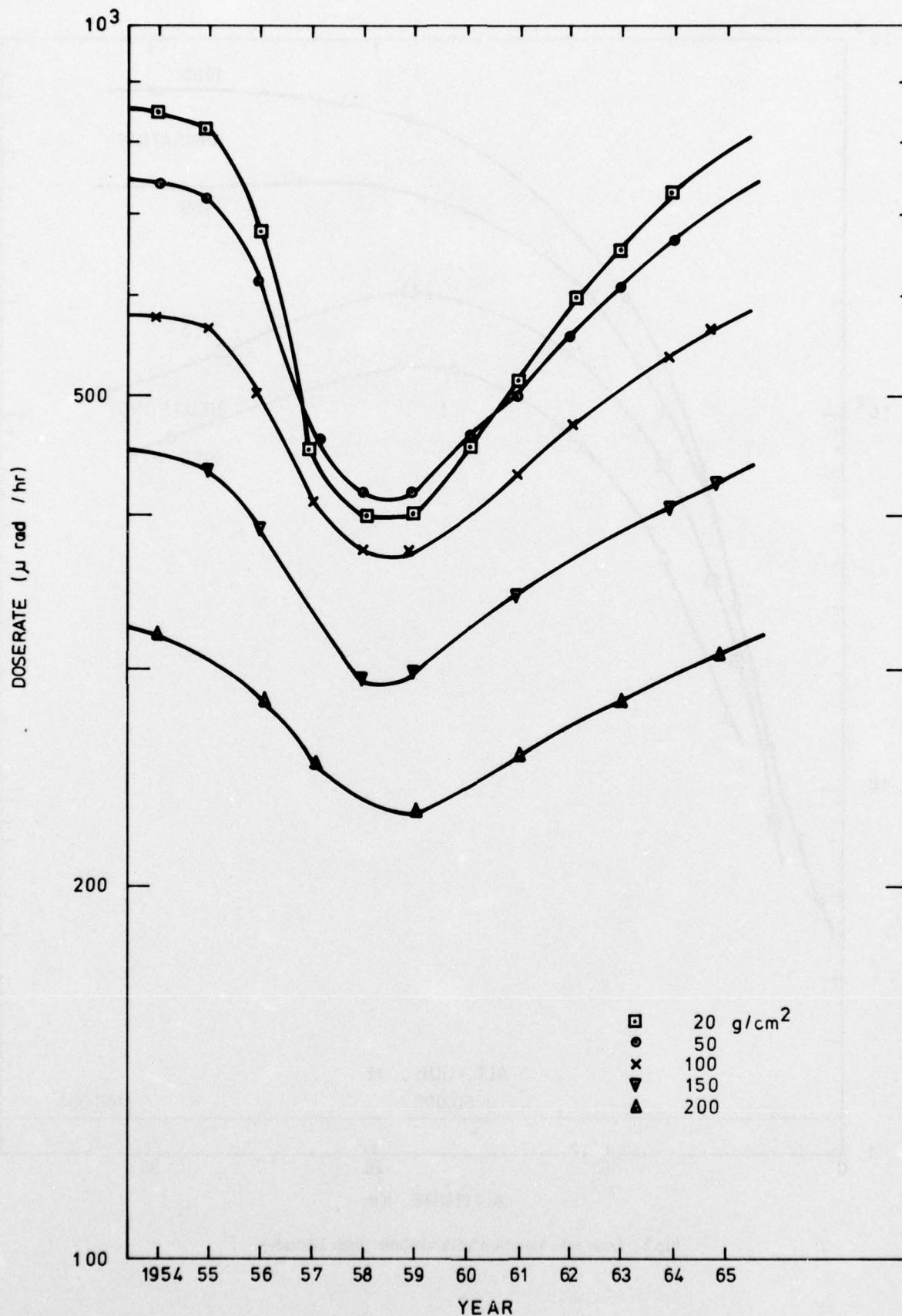


Fig.3 Ionisation dose rate at high latitudes

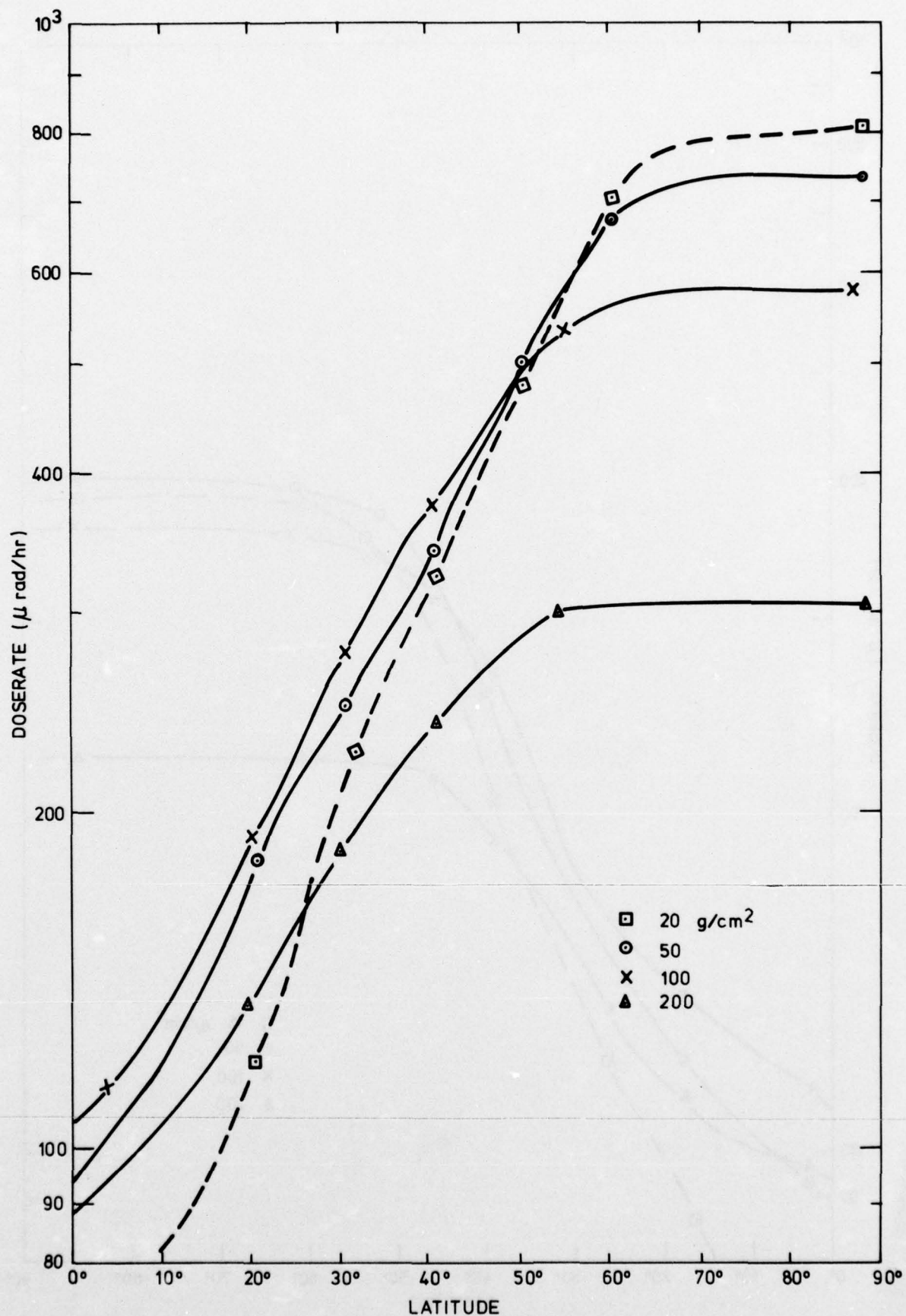


Fig.4 Ionisation dose rate at solar minimum

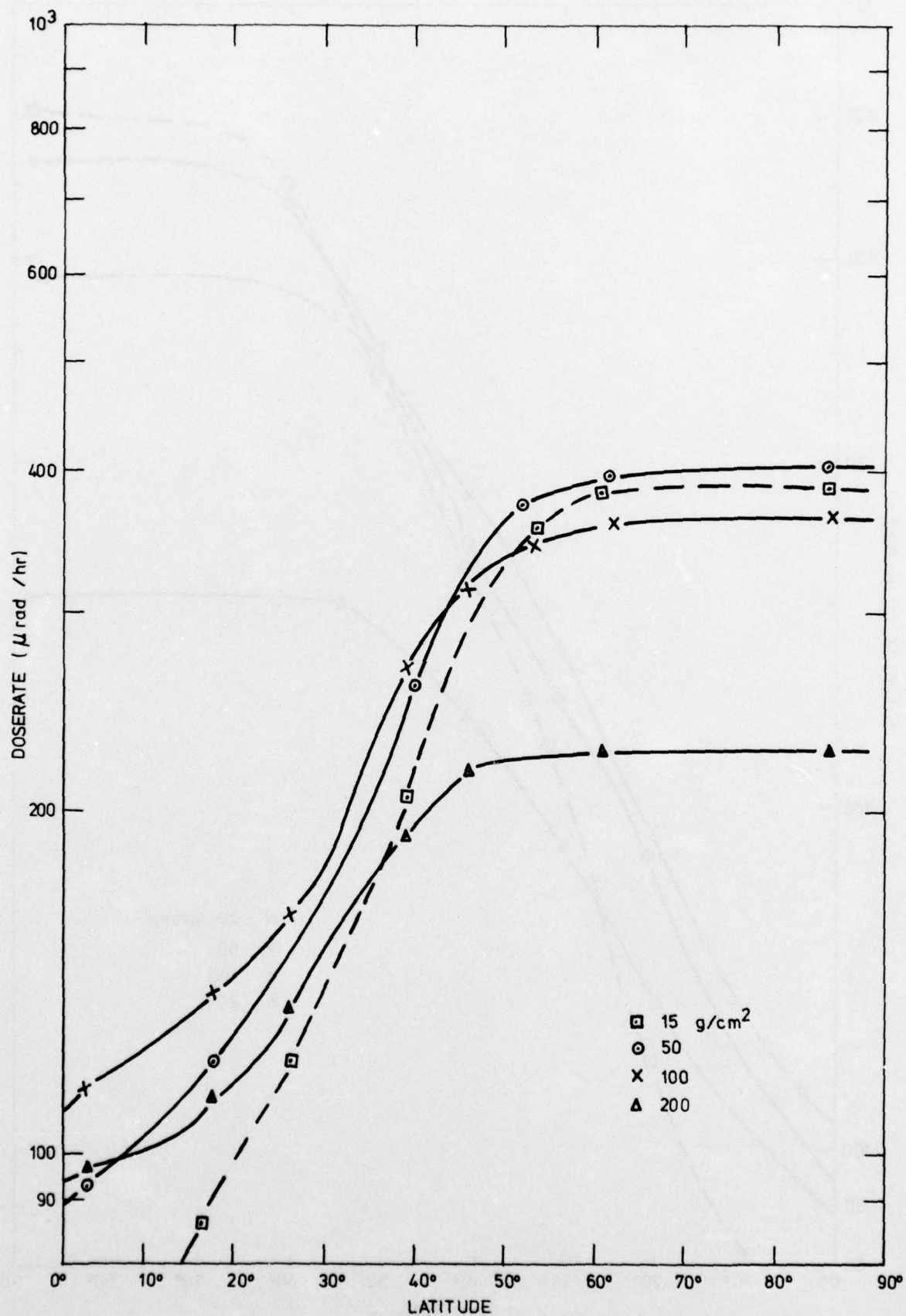


Fig.5 Ionisation dose rate at solar maximum

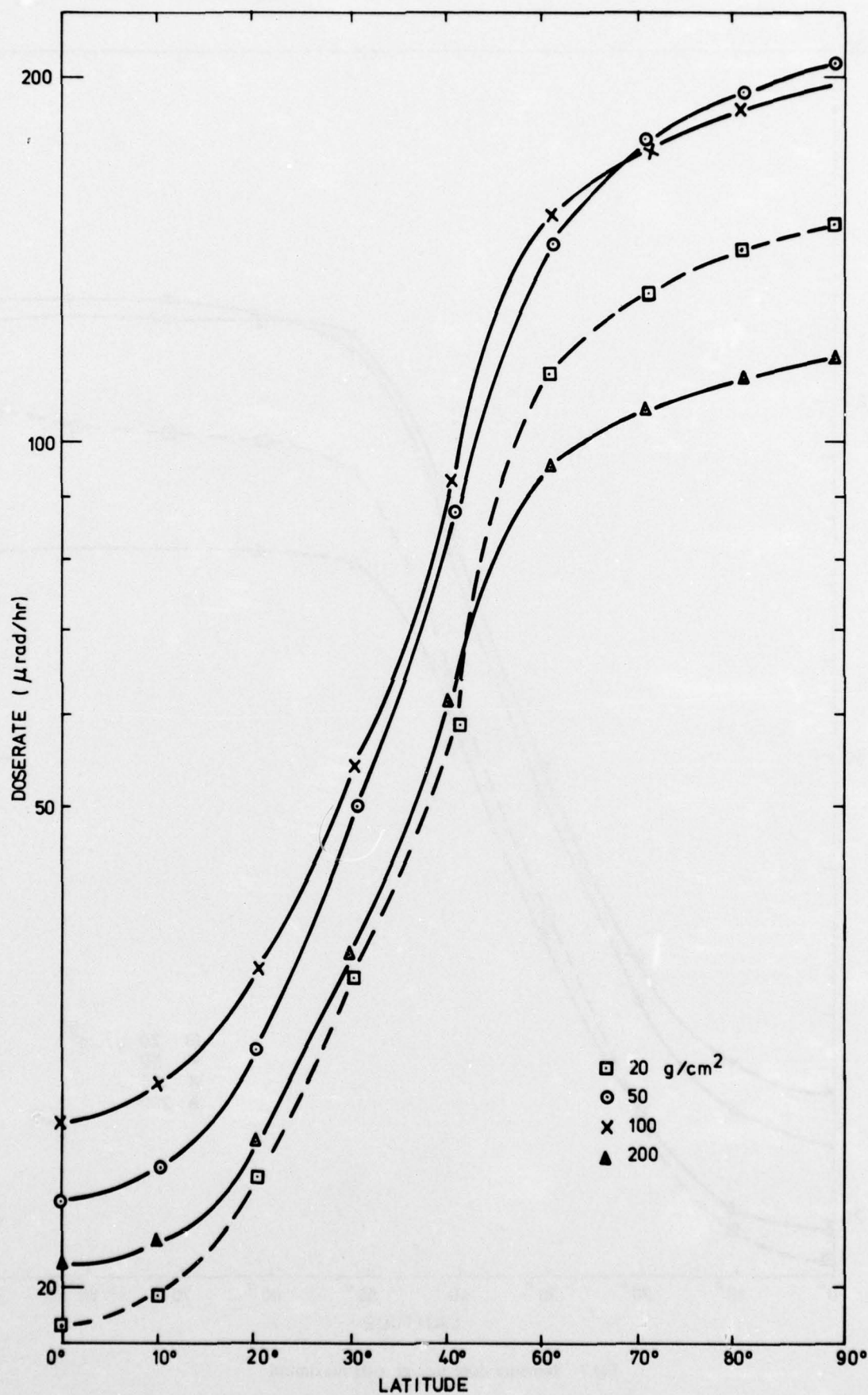


Fig.6 Neutron dose rate at solar minimum

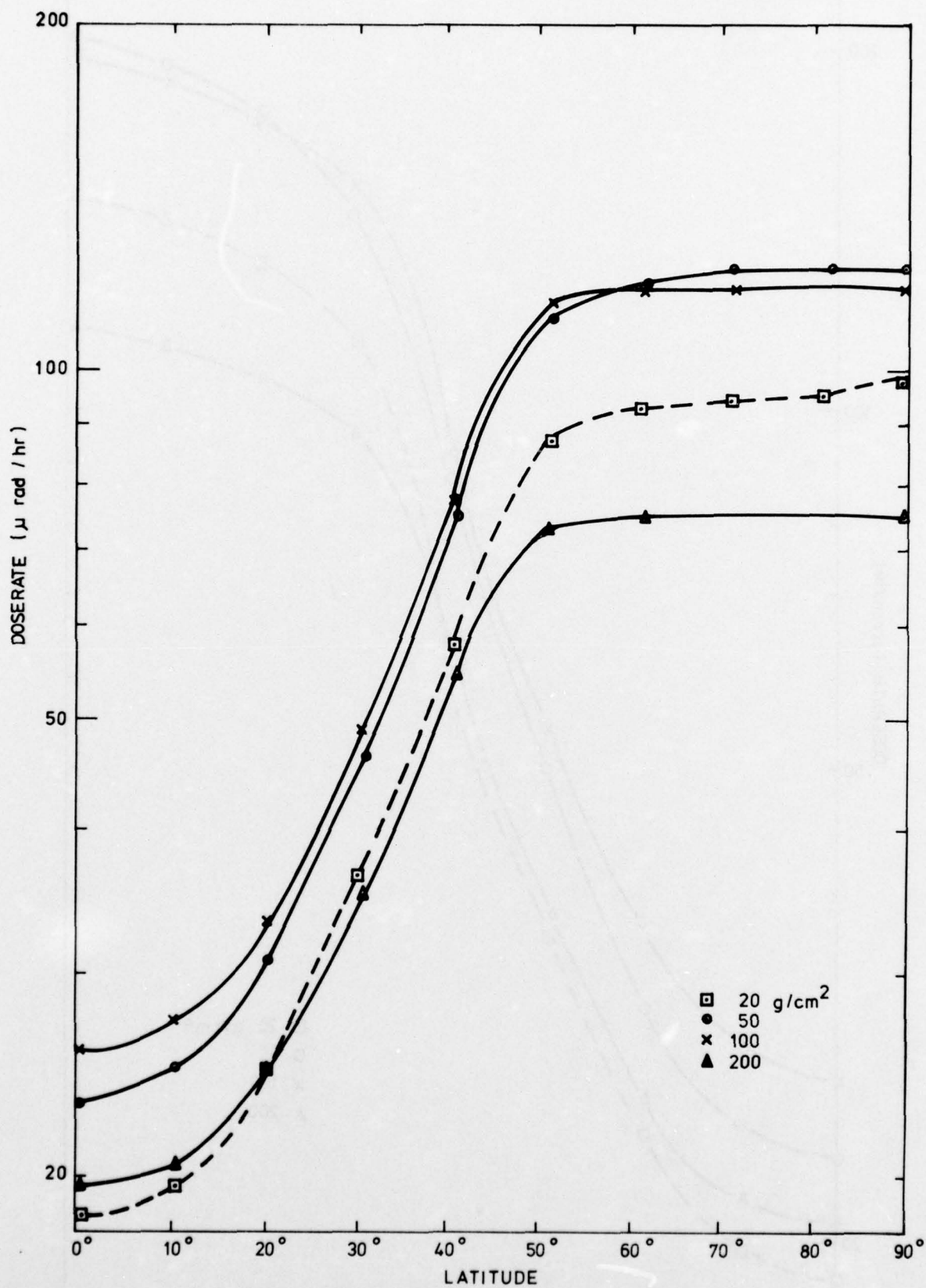


Fig.7 Neutron dose rate at solar maximum

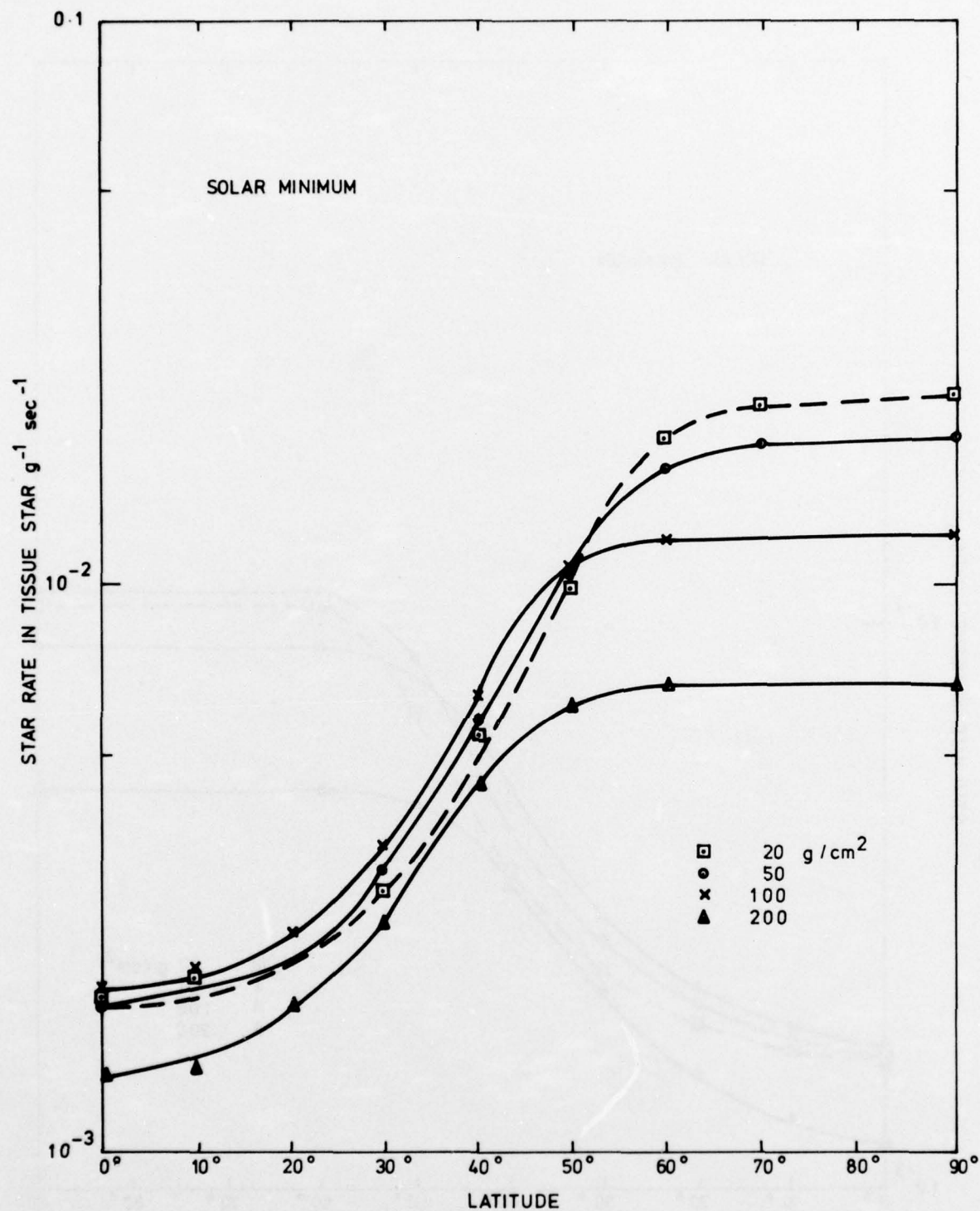


Fig.8 Tissue star frequency (solar minimum)

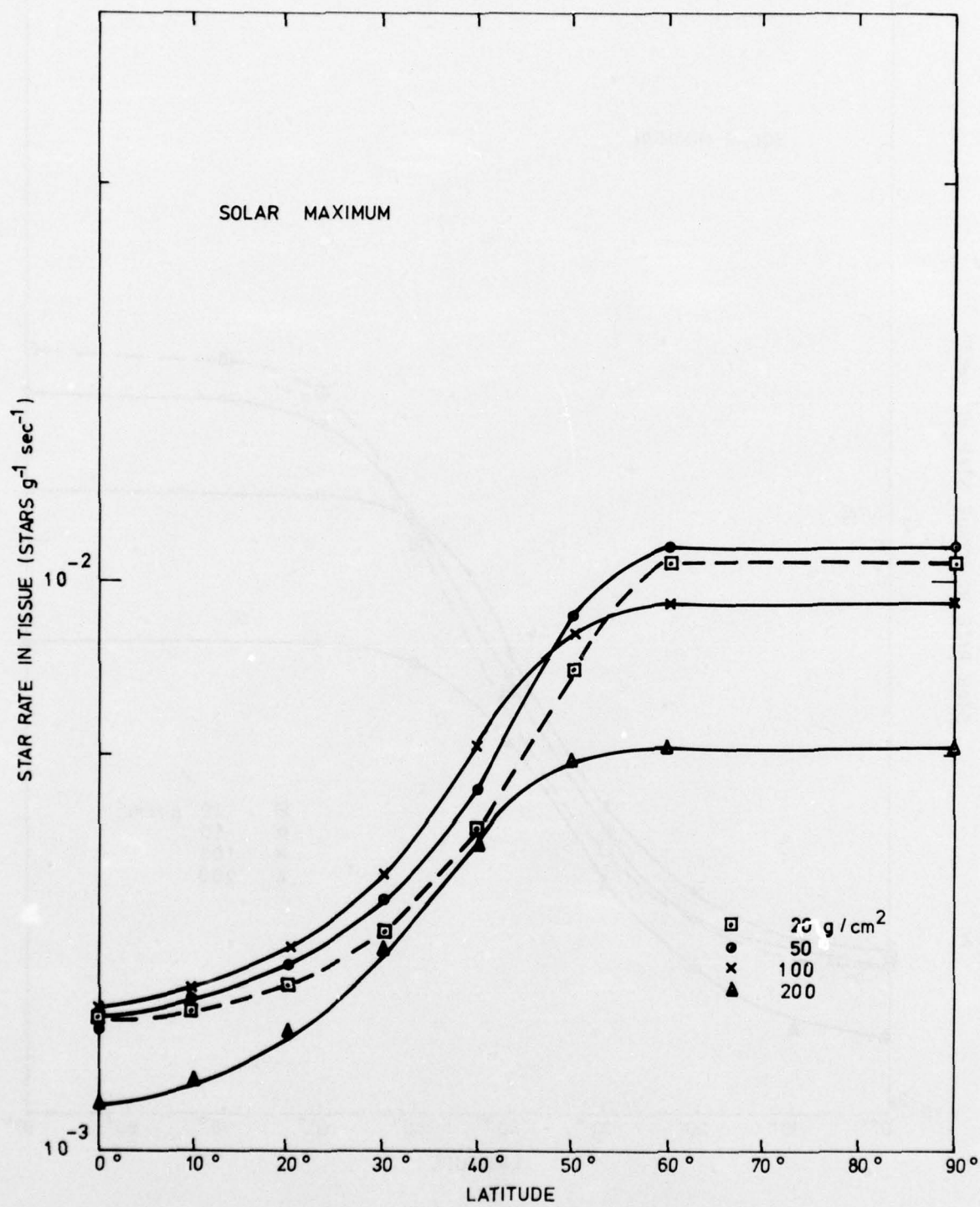


Fig.9 Tissue star frequency (solar maximum)

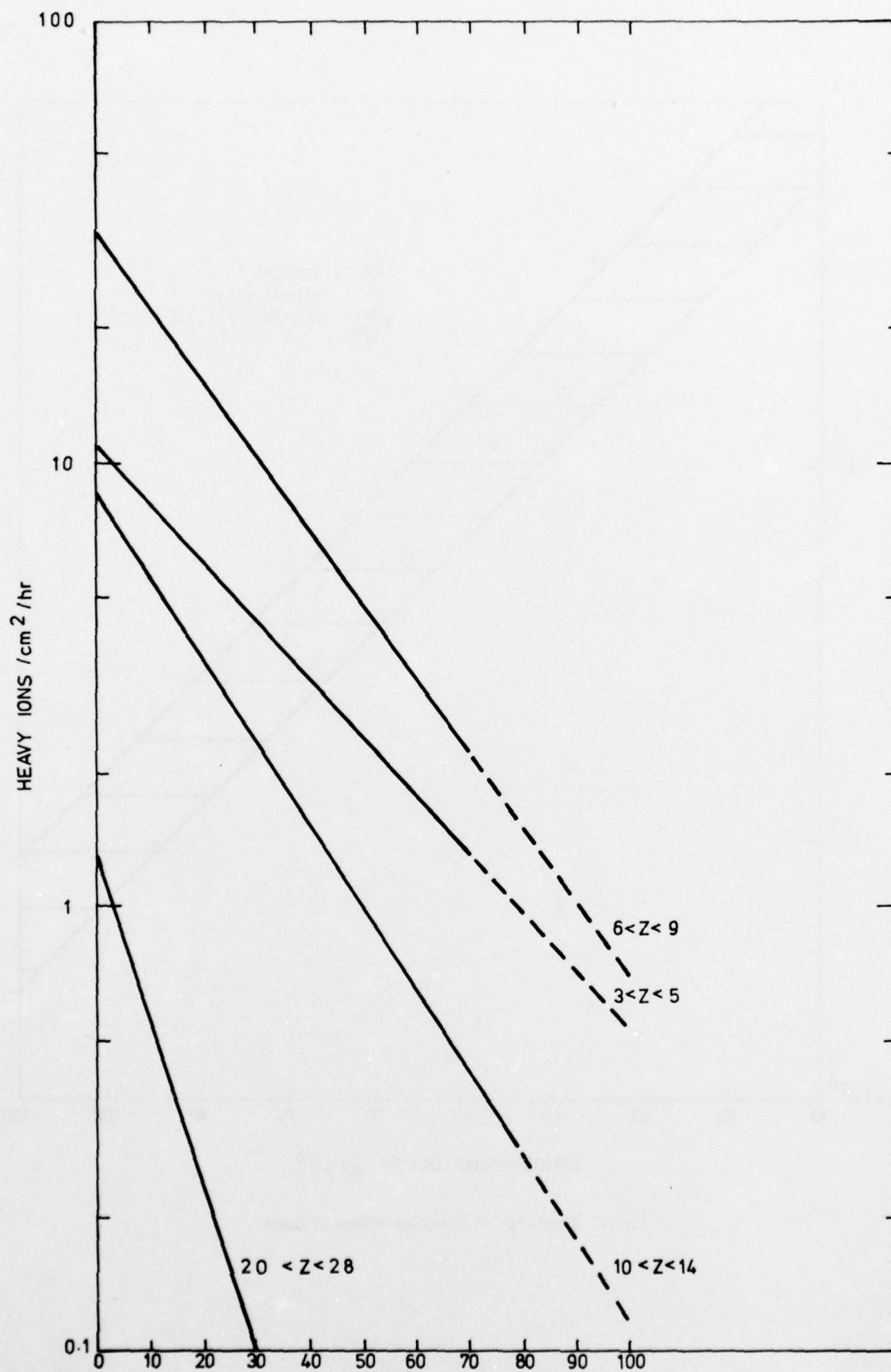


Fig.10 Variation of heavy ion flux with depth in atmosphere

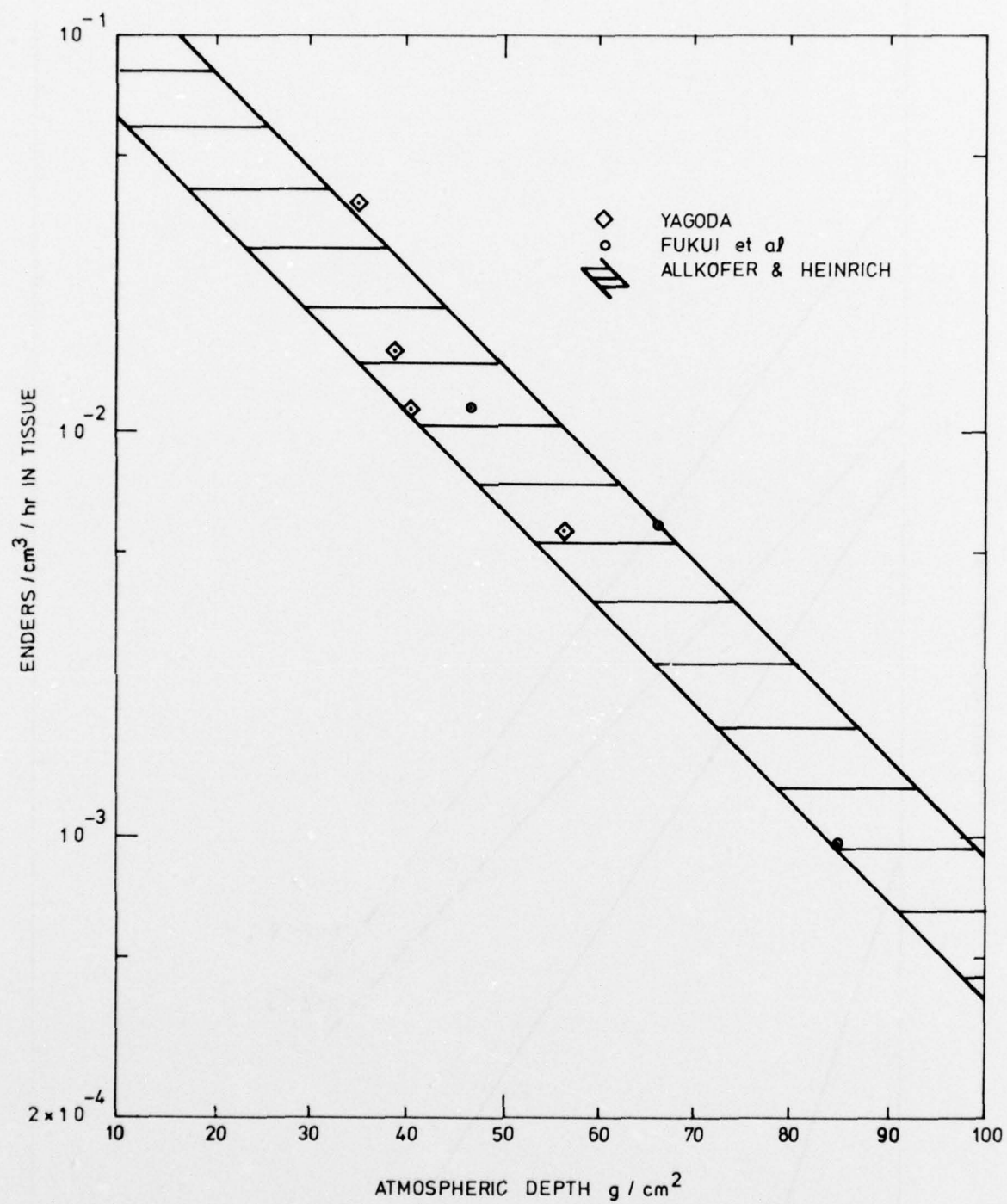


Fig.11 Frequency of heavy ion enders in tissue

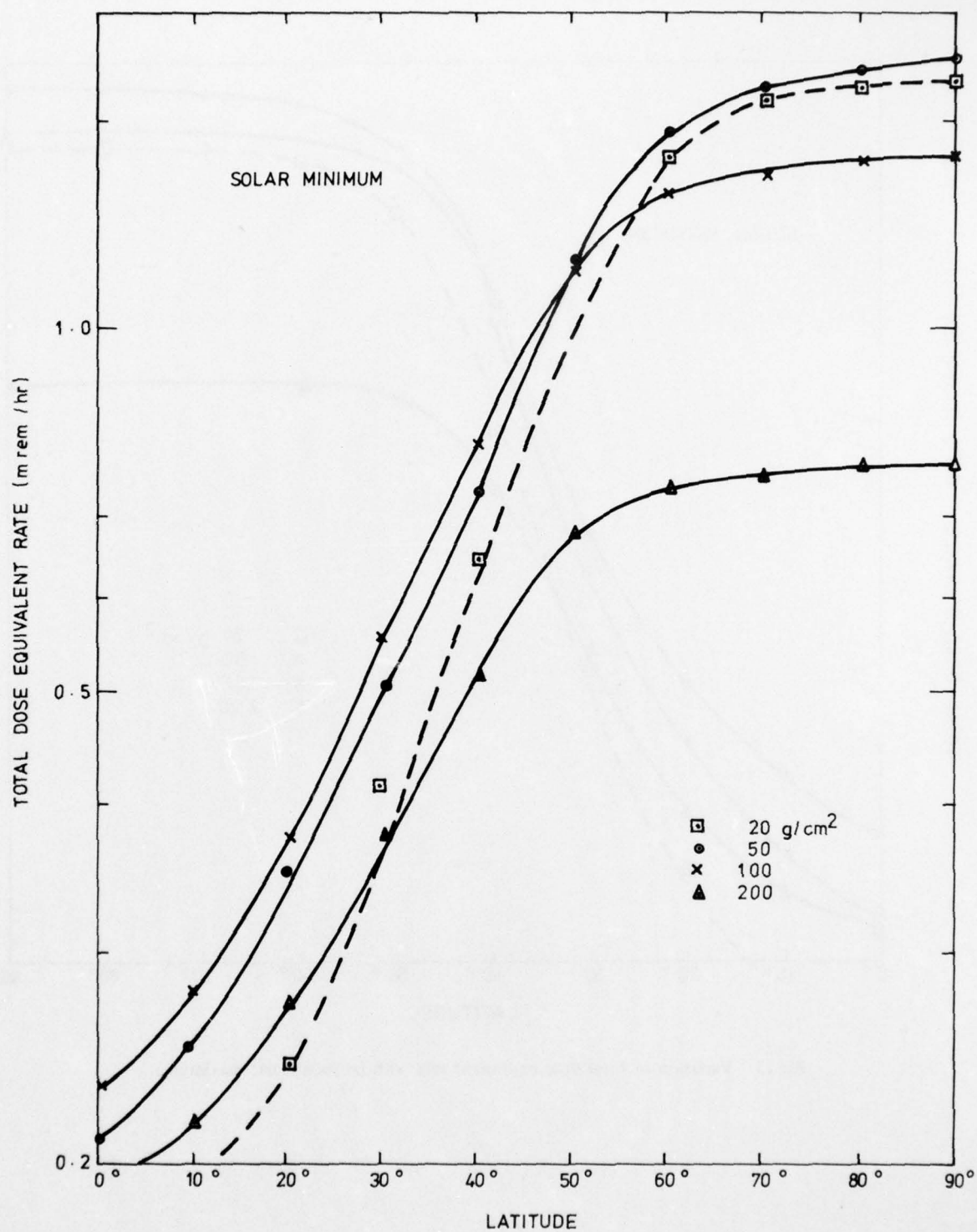


Fig.12 Variation of total dose equivalent rate with latitude (solar minimum)

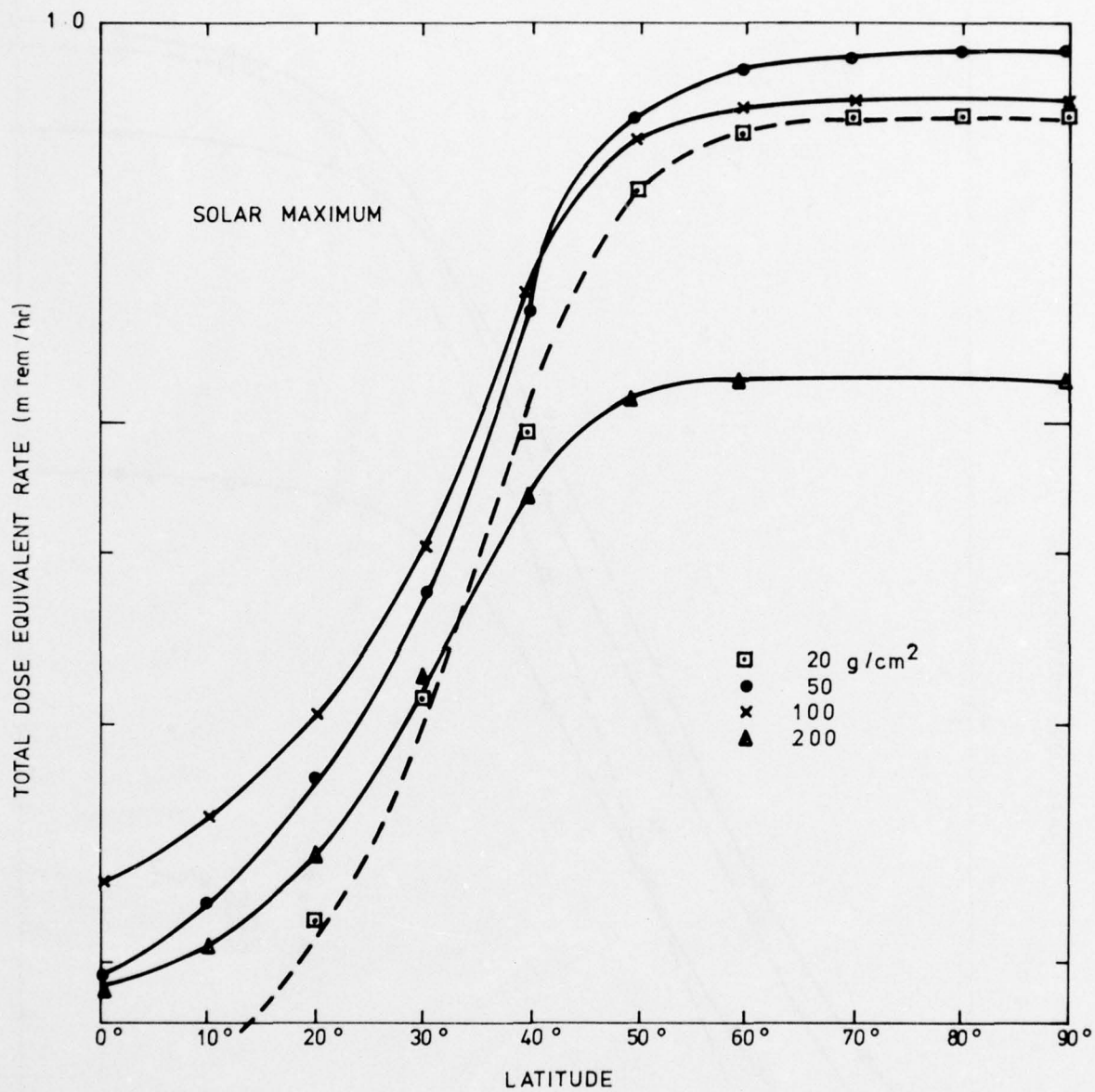


Fig.13 Variation of total dose equivalent rate with latitude (solar maximum)

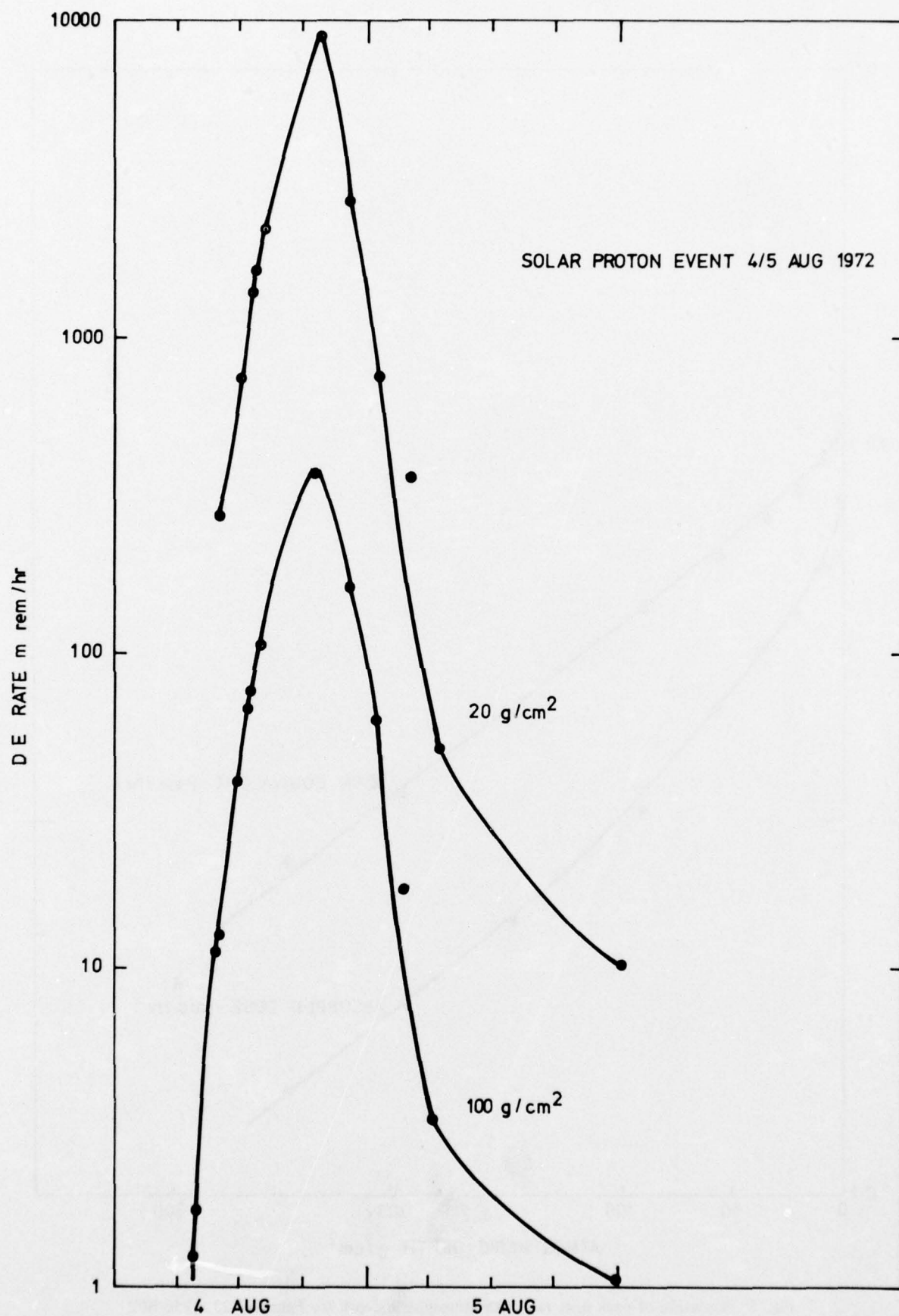


Fig.14 Variation of DE rate with time at 20 and 100 g/cm² for August 1972 SPE

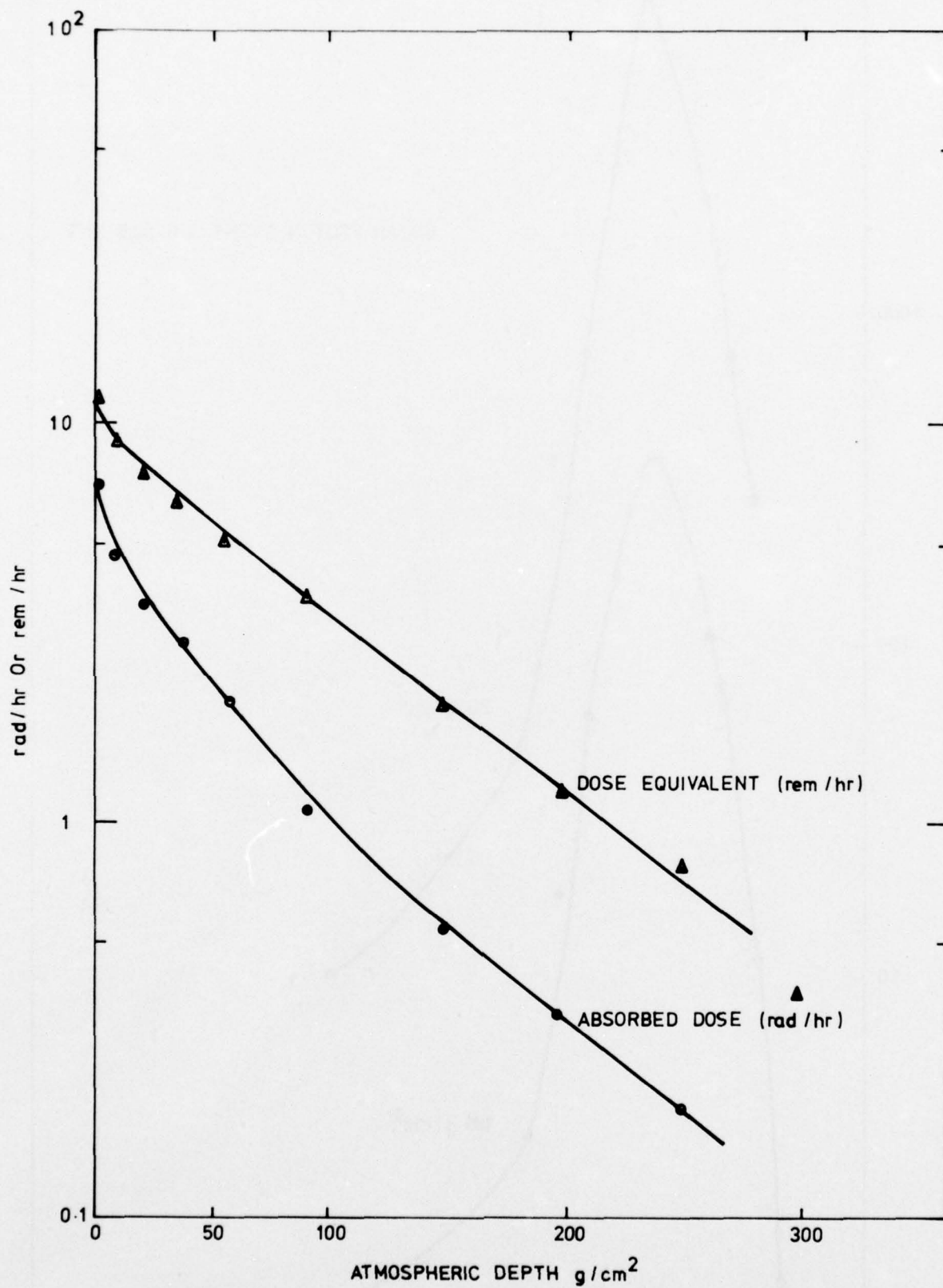


Fig.15 Variation of peak dose rate with atmospheric depth for February 23, 1956 SPE

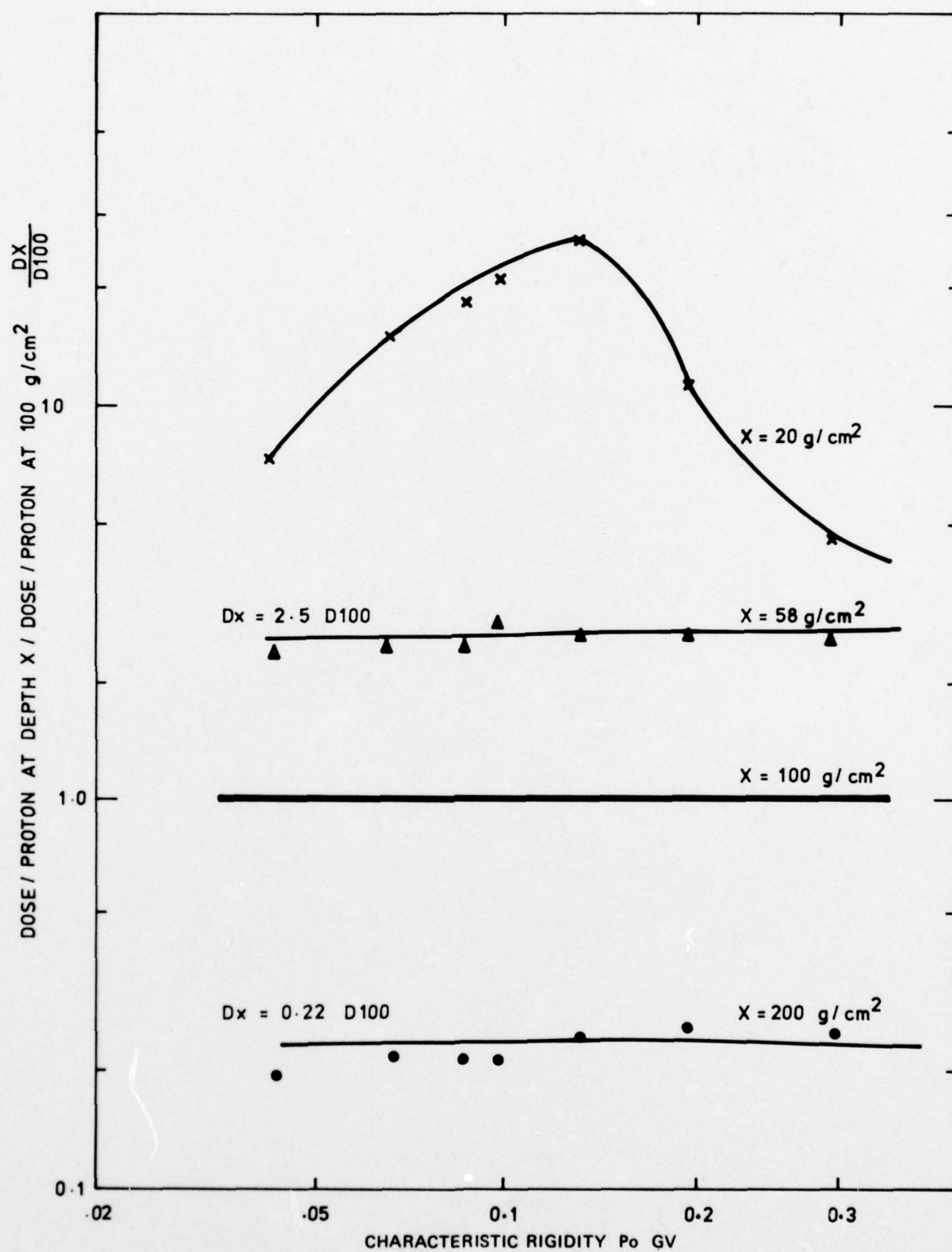


Fig.16 Variation of atmospheric attenuation with characteristic rigidity

BIOLOGICAL STUDIES OF COSMIC RADIATION

by

Col. R.P. Delahaye, MC, FAF
Hôpital Bégin
94160 Saint Mandé, France

and

Professor A. Pfister
C.H.U. Necker
156 rue de Vaugirard
75730 Paris, Cedex 15, France

1. GENERAL

1.1 Basic Principles of Radiobiology

Studies of the effect of cosmic radiation on living matter could be based on conventional radiobiology data. Unfortunately such data have little application to cosmic radiation. The following facts will serve to recall the various ways in which radiation interacts with matter.

1.1.1 Electron Interaction

A charged particle or electromagnetic radiation may cause an electron:

- to be dislodged from the outermost shell: i.e. ionisation;
- to jump to another shell: i.e. excitation.

1.1.2 Nuclear Interaction

High energy particles (p, n, alpha, heavy ions) give rise to the following:

- inelastic collisions: the target nucleus bursts into fragments (formation of stars);
- elastic collisions: the ejection of the target nuclei produces secondary orbits. The accelerated electrons form an ionisation ring around the orbits of the heavy ions (delta rays). The main result of ionising radiation is that it causes ionisation which produces secondary or primary bursts which modify the molecules encountered.

In addition, ionisation produces free radicals which give rise to physical and chemical changes in their vicinity. Cells and tissues develop radiolesions of a temporary or permanent nature, depending on the severity of the attack and the regenerative power of the cells.

In connection with the primary cosmic radiation, which contains very high-energy particles, it is not impossible, although not yet confirmed, that other phenomena are also involved: mechanical shock waves characterised by the production of phonons, thermal effects localised in certain cell structures with a tendency to heat absorption (melanin pigments), and photon effects on the pigments of the retina.

1.2 Problems Presented by the Biological Study of Cosmic Rays

It is possible to simulate the effects of cosmic rays.

The Berkeley Lawrence Laboratory has successfully accelerated heavy particles, classes L and M (see Table I) up to 2.1 GeV per nucleon. Of the various types of heavy ions these are the particles most frequently found. It is thus possible to study the effect of heavy ion "enders" in tissues. It is known that ionisation effects are greatest in this area of their track. This property could possibly be used in the treatment of tumours which are not easily accessible. It is now becoming possible to study the effects of the class H ions (neon and argon).

Results of the research in space using satellites are difficult to interpret because of the wall effect which alters the cosmic radiation spectrum, and particularly because of the physical flight factors (vibration, acceleration, weightlessness) which may work together with, or in opposition to, ionising radiation.

The use of stratosphere balloons avoids the factors inherent in space flights but exposure has to be of limited duration only, and the particle flux is too low.

TABLE I
Classes of Heavy Ions

<i>Class</i>	<i>Z scale</i>	<i>Atomic nucleus</i>
L light	3 – 5	Li, Be, B
M medium	6 – 9	C, N, O, F
H heavy	10 – 19	Ne with K
VH very heavy	10 – 28	Ca with Ni
SH super heavy	> 28	

1.3 Research Facilities

Table II summarises the various facilities available to researchers.

TABLE II

<i>Location of experiments</i>	<i>Type of research</i>	<i>Advantages or disadvantages</i>
On the ground	Investigation of the effect of secondary cosmic radiation on biological specimens under different conditions: – at sea level and at altitude – at sea level and underground – with and without protection	Duration of experiment too long Dose rate too small
	Study of heavy nuclei	The Berkeley Lawrence accelerator permits basic study of the effects of lesions caused by heavy particles of class L, M, and H for energies up to 2.1 GeV/nucleon
In the air	Balloons: Study of heavy nuclei of primary cosmic rays	Short duration of the experiments (a few hours) but allowing a discriminatory study of high-energy heavy nuclei by avoiding the physical parameters inherent in space flight
	Rockets: Measurement of dose rate and exposure of biological specimens	Duration of experiment too short
	Satellites: Exposure of a number of specimens and measurement of numerous parameters	Experiments of long duration. Possibility of using the same flight paths as for manned flights. Disadvantage: parameters associated with space flight

1.4 Research Aims

In a living organism some structures are more valuable than others:

- *on the molecular level:* the nucleic acids which transmit hereditary characteristics and control the specificity and the metabolism of the cells;
- *on the cell level:* certain highly developed cells:
 - nerve cells, which are very resistant to ionising radiation, since they are non dividing. However, the deterioration which they undergo is functional and may be irreversible;

- parent cells, and particularly young cells of the germinal and blood-forming lines, and the cells covering the epithelial tissues in the digestive system, which are frequently renewed.

2. EXPERIMENTS ON THE GROUND

2.1 General

These have to be carried out at ground level and use natural cosmic rays, with or without protection. Other experiments can be performed by sensitising at ground level the radiobiological effect of natural cosmic radiation. All these experiments require constant environmental conditions (temperature and humidity) over long periods since the cosmic radiation on the ground distributes only very small doses.

2.2 Ground Experiments

2.2.1 *Biological Effects of Natural Cosmic Radiation*

The experiments performed are always of the same type: comparing biological specimens placed under the direct action of the radiation with those shielded from it by rocks or lead.

Babcock and Collins (1929) (Ref.27), placed drosophilae in a tunnel 140 metres under the ground so as to isolate them from the action of galactic cosmic radiation. The radiation background (natural radioactivity of the rocks) is higher there, however, than at the surface. The rate of mutagen disorders observed among the drosophilae placed in the tunnel was higher than that of the reference sample at ground level. Galactic cosmic radiation is not therefore the only factor responsible for this increase.

Engelstadt and Moxness (1934) (Ref.27) kept mice in a well for a year, but did not observe any difference by comparison with the sample living at the surface.

H.Planel, J.P.Soleilhavoup et al. (1969) (Ref.23) investigated cultures of paramecia (paramecia caudatum and paramecia aurelia) in enclosures penetrable by radiation, and in two chambers with 10 cm thick lead walls. Cultures were placed in a cave at Moulis (Ardèche) under 200 metres of rocky topping. In each case radiation protection resulted in reduced reproductive capacity and a lengthening of the cell cycle. Restoration of a normal level of irradiation in the protective chambers was accompanied inversely by a return to normal of the growth of the shielded populations.

A slight activation effect was also found in the case of the lead shielding when manipulation took place on ground which had strong natural radioactivity.

With drosophila melanogaster, a reduction in the galactic cosmic radiation dose resulted in longer embryonic and larval development stages. All these facts show that natural ionising radiation (in this case, G.C.R. or telluric radiation) can have the effect of stimulating certain living organisms.

2.2.2 *Biological Effects of Excited Natural Cosmic Radiation*

In these experiments the incident radiation activity is increased by placing thin metal foils in front of the biological specimen to produce stars and showers of particles.

Brajewski, Krebs and Zickler (1935) (Ref.27) used lead screens which produced showers under the action of G.C.R. Protein solutions, mushrooms and drosophilae were subjected to this irradiation. After 4 to 6 weeks of exposure, the researchers observed three times as many mutations as in the reference sample. Under the electron microscope they counted up to 30 000 particles of flocculent proteins, while there were four times fewer in the reference sample.

J.Eugster (1935) (Ref.12) showed that the rate of hatching of prawn eggs (artemia salina) exposed to cosmic rays at 3500 metres was reduced from 80% to 4%.

Brown, Webb and Bennett (1958) (Ref.27) observed a relationship between the biological activity of different specimens and the G.C.R. dose rate. Boxer crabs, colourless at night, are dark coloured, brown or cerise during the day. This pigmentation, which is independent of the brightness of the surroundings, is a hormone effect. It disappears at night, even under artificial light.

Brown noted that irradiation by showers of particles prevented this change in colouring. G.C.R. at ground level acts on the internal secretion organs which affect colour changes.

Eugster (1963) (Ref.13) has shown that stars formed from particle interaction contribute to the development of skin cancers. In this experiment which took place at the top of the Jungfrau (3800 metres) pre-cancerous lesions

(arsenical dermatosis) were exposed to radiation under a thin gold foil covered with a nuclear emulsion plate. Cancerous development occurred along growth strands lying in the axis of certain branches of the stars.

All these experiments confirm the excitation effect on biological mechanisms, already observed with natural radiation. They show that any exaggeration of this effect results in lesions (effect on mutagen, indirect effect on functioning as a result of humoral action following a provoked neuroendocrine disorder, development of tumours). However, as suggested by K. Buttner⁷, it is by no means certain that cosmic rays alone were the sole factor in all these experiments and, apart from Eugster's experiment, extrapolation to human beings is still somewhat risky.

3. UPPER ATMOSPHERE EXPERIMENTS

The composition of the cosmic radiation which reaches the ground is very different from that in the upper atmosphere or in space. The primary galactic radiation is characterised by the presence of high-energy particles. About 1% consists of heavy nuclei. The radiation is converted when it passes through the metal walls of the sealed containers carrying the experimental specimens. Stars, secondary particles and gamma rays are produced. The activation effect noted on the ground is still present, but is accompanied by the direct destructive effect of highly energetic particles.

3.1 Balloon Experiments

* In 1934 G.G. Frizen (USSR)²⁷ put drosophilae in a balloon and kept them for two hours at a height of 15 900 metres. No significant results were obtained and this was confirmed in the USA by Briggs, Meier, Jollos and Rogers (1934-1963).

Between 1951 and 1957 under the direction of Bushnell²⁷ a number of radiobiological studies were undertaken in the USA. Balloons remained at a height of 30 km for nearly 24 hours. Various biological specimens were exposed: neurospores, drosophilae, plant seeds, eggs and sperm of prawns, crabs and grasshoppers, mice, guinea pigs, hamsters, lower order monkeys, and cells and cultures of human tissue. Many of the tests failed because of inadequacies in the methods of ensuring proper conditions for life at altitude, and the return and recovery of the biological subjects. The results obtained were therefore very few and often of doubtful value. The behaviour and the results of the higher activity tests of monkeys, rats and mice observed some time after the flight (D.G. Simons and Steinmetz^{24,25,26} were not affected. Careful histological study of the tissues of these animals, and in particular of the central nervous system, showed no difference as compared with the reference samples (P.A. Campbell and Haymaker). Genetic changes of little value statistically were found in the neurospores, grasshopper sperm and eggs, shellfish eggs and tissue cultures.

Lebish, Simons and Yagoda (1949) (Ref.26) exposed 85 mice in balloons at heights of between 24 and 32 km. These animals received close to 7300 particles with $Z > 6$. No significant changes were observed in relation to average duration of life, the state of the nervous system and of the higher nervous activity, or the frequency of occurrence of tumours and various diseases. The gonads showed no histological change.

D.G. Simons (1959) (Ref.26) studied the effect of cosmic radiation on the crystalline lens of young white mice. After exposure, their eyes were examined with a slit lamp and also by microscope methods. No lesion was found.

S.B. Pipkin and W.N. Sullivan (1959) (Ref.22) exposed 10 761 drosophilae for 16 hours at an altitude of 25 km. No ruptures and no genetic changes in the X chromosome were discovered.

J. Eugster and D.G. Simons independently observed mutation^{14,26} as a cosmic ray effect on barley seed, which produced dwarf or giant strains. Using nuclear emulsions Eugster was able to confirm that the mutation observed occurred only in seed touched by cosmic radiation particles. The reference samples of seed kept on the ground and the experimental seeds untouched by the radiation did not differ from the normal. The number of grain ears and seeds went down by 30 to 40% in the strains produced by the seeds affected by the radiation. The mutation was observed down to the fourth generation: some seeds changed colour but the number of ears and seeds showed no further change.

Fragments of human skin and of skin of a rabbit which had survived were exposed to cosmic radiation and then grafted after the flight. In some cases a pigment spot appeared and this changed colour during the following months. J. Eugster considered that this spot was due to the impact of a heavy particle.

H.B. Chase^{8,9} exposed 185 mice and 5 guinea pigs at an altitude of 30 km during the course of 9 balloon flights. He noted the appearance of small tufts of hair without any pigment on the fur of the mouse, C57 Black, during the weeks following the flight.

D.G. Simons²⁶ stayed for more than 30 hours in a balloon at an altitude of 32 km. On his return to earth no ill effects were observed immediately, but a few weeks later white hairs appeared on the back of his hand in the exact spot where a nuclear emulsion had detected very energetic cosmic ray particles.

These last two results led to simulated experiments on the ground using the Berkeley heavy ion linear accelerator (HILAC), and microbeams of electrons 20 to 200 micrometres in diameter, at Mount Vernon Hospital. Chase and Simons obtained confirmation of their experiments. They suggested that whitening of the hair as a valid test of skin reaction to heavy ions. They observed that a special radiobiological mechanism existed in which irradiation has not only a direct lesional effect but also a neighbouring effect with local and delayed consequences.

From 1963 to 1967 the Centre d'Enseignement et de Recherches de Médecine Aéronautique de Paris (A.Pfister, G.Deltour et al.)^{2,3,20} undertook a study of the heavy ions in cosmic radiation in collaboration with the Centre de Recherches Nucléaires de Strasbourg (P.Cuer and R.Kaiser) under the aegis of the Centre National d'Etudes Spatiales. They obtained the same results as those of Chase in regard to mouse C57 and supplemented this work by histological and autohistoradiographic methods. In the areas in which there were lesions they observed the presence of inactive or degenerate hair follicles, the absence of melanin, and a local deficiency of proteinic metabolism and of melanin synthesis. A test for correlation between a damaged area and the track of heavy particles was carried out using a black rabbit, part of whose skin was covered with a nuclear emulsion. These experiments confirmed that heavy ions were responsible for determining the loss of pigment, and clarified the manner in which they produced this effect. There was no visible destruction, but there were irreversible effects on cell functioning affecting certain specific properties (melanin synthesis, regenerative power of the external sheath of the hair root) and appearing some time later. Altogether, the considerable extent of the lesion was surprising, in view of the smallness of the particle involved.

During the same period Haymaker¹⁶ investigated a large number of histological sections of brain tissues of macaque monkeys which had spent from 10 to 48 hours at an altitude of 40 km. He found linear degenerative lesions of the cerebral substance. In the absence of valid physical correlation, he was unfortunately not able to draw any conclusions from this very important work by attributing definite responsibility to the heavy ions in cosmic radiation. Additional experiments using proton and deuteron microbeams produced linear lesions fairly similar to those he had noticed on the monkeys exposed to cosmic rays. He found that the lesion threshold required considerable doses out of all proportion to those delivered in the ionisation cylinders of heavy ions of the L, M and H class described by Schaefer. Other simulated experiments were carried out by Curtis^{10,11}, who simulated a heavy ion track by concentrating 22 MeV deuterons produced by the Brookhaven cyclotron. He used this method for irradiating the brain and eyes of mice. Brain matter was destroyed with a dose of 14 000 rads, using a 1 mm diameter beam, but for the same effect with a 25 micrometre microbeam a dose of 400 000 rads was necessary! The anterior epithelium of the lens of the eye showed no lesion or tendency to cataract except with the 1 mm beam. Curtis concluded from his research that heavy ions were not significantly dangerous to brain tissue or the eye: cell lesions were individual, localised to the ion track and did not increase to any great extent the natural mortality rate of nerve cells which, in humans, is about 10^4 per day. He added that the serious lesions sustained with the 1 mm beam were due to an indirect effect as a result of deterioration of the blood vessels.

These conclusions gave rise to much discussion, particularly by C.A.Tobias, because of the difficulty of denying the existence of localised lesions to unregenerative cells. The DNA of nerve cells may be damaged and create disorders which cannot at present be diagnosed. At worst, many nerve cells may be destroyed without our knowing it. Some authors, such as H.R.Mole, feel that the problem of the effects of any destruction of nerve cells by cosmic radiation, bearing in mind that there is always a certain amount of natural destruction, must be a matter for study over a number of years. Furthermore, it seems clear that it is not actually possible to compare a deuteron beam with a heavy ion track which has a ring of delta rays and causes along the full length of its path nuclear interactions (inelastic collisions) the particles of which may produce extensive local damage. The Soviet authors assume that delta rays may have a range of 3 to 4 centimetres.

Since 1971 the Groupe de Recherche de Biologie Spatiale (G.R.B.S.) under the C.N.E.S. has been carrying out research in France on galactic cosmic radiation from the launching base at Aire-sur-Adour. This group comprises several laboratories:

- the Laboratoire de Biologie Médicale of the Paul Sabatier University in Toulon (Director: H.Planel);
- the C.E.R.M.A. (Médecin Général Gibert, Drs Nogues and Despres);
- the C.E.N. Physical Dosimetry Service (H.François) at Fontenay aux Roses;
- the Laboratoire d'Histologie C.H.U. at Necker (A.Pfister);
- the Laboratoire de Physique Corpusculaire of the C.N.E. at Strasbourg (P.Cuer and R.Kaiser);
- the Laboratoire de Biochimie et d'Enzymologie of the Gustave Roussy (Paoletti) Institute at Villejuif.

Two kinds of research, relating to single-cell organisms and drosophilae, were undertaken on the activation effect of galactic cosmic radiation¹.

The species used was *paramecium aurelia*, certain parent forms of which are sensitive to radiation while others are radiation resistant. Irrespective of the duration of the balloon flight (up to 11 hours), a slowing down of the growth rate was observed on the second and third days after exposure. This was followed in every case by a still significant acceleration in growth on the fourth and fifth days. This activation effect became correspondingly stronger the longer the balloon remained at its maximum height. To eliminate any temperature variation which might have masked the activation effect by slight cooling during the ascent of the balloon, a temperature control device

($25^\circ \pm 0.1^\circ$) was used. The doses received, as measured by thermoluminescent detectors, reached 1.7 millirad for a flight of about 6 hours at the ceiling height. The doses received by the reference cultures left on the ground for the duration of the experiments amounted to 0.5 millirad.

Ten experiments with *Drosophila melanogaster* were carried out with 2831 eggs during balloon flights, an identical number of reference eggs being left on the ground under the same environmental conditions. After the flights all the eggs were placed in the same incubator and the time taken for embryonic and larval development was determined. It was shown that exposure to primary and secondary G.C.R. produced a constant activation effect which was significant for embryonic and larval development, if female germ cells which were either adult or in the process of maturation were irradiated.

An investigation into the possible effect of cosmic radiation on the life span of *Drosophila* was undertaken during four of the balloon flights. There was no indication of any change in the average life span of the two sexes. The authors consider that this was due to the relatively short duration of irradiation by comparison with the total life span of the *Drosophila*.

A. Pfister and G. Nogues¹ investigated the effects of damage caused by heavy ions to the brain of a rat. 20 rats were subjected to balloon flights which included a period of about six hours maximum height. Ilford K5 plates of nuclear emulsion 1 mm thick by 10 mm by 21 mm were previously inserted in the skull under the skin. A fortnight after the flight, the animals were destroyed by intravascular injection of Bodian fluid. The brains were cut sagittally into serial sections 5 micrometres thick. The linear tracks of 19 heavy particles (classes L and M) were extrapolated in the nerve tissue and histological data were obtained from 8 of them. The lesions were of two kinds:

- (1) In most cases the track showed disseminated dark neurones along its path, with occasionally satellitosis or neuronophagia images. Sometimes more extensive areas of darkened neurones were found, perhaps at the end of the tracks. This type of change is normally seen when the nerve tissue has been fixed at a late date or has been damaged before being fixed. This aspect can, however, be considered as pathognomonic of a functional disorder of the neurone. It occurs in hypoxia and in cyanide poisoning.
- (2) A different type of lesion was found in one case. This was located on the path of an M-class heavy ion which had penetrated the cerebellum, going from right to left and slightly to the rear. Following this path, a few dark granular cells with a pyknotic nucleus were found first of all, then an oedematous centre with a reduced cell population, conical in shape and occupying a space of about 0.5 mm^3 , and finally an extensive dispersion area containing a large number of multi-coloured neurones. In the damaged centre it was noted that 30% of the granular cells and the Purkinje cells had disappeared, the blood vessels were congestive and oedema was present. The Purkinje cells often showed signs of degeneration: chromatolysis, vacuolisation of the cytoplasm and an irregular nucleus. The Bodian colouring fluid showed up rarefaction of the neurites and the synapses accompanied by changes in the axial white matter. It was surprising not to find gliosis or signs of inflammation. Everything looked as though this portion of the cerebellum had been destroyed in a random fashion.

It would be desirable for these results to be confirmed by exposure experiments in a heavy particle accelerator.

To sum up, the considerable amount of research undertaken using balloons has produced the following facts:

- activation effects occur in the case of small homogeneous doses;
- damage to cells and tissues is functional rather than organic, and extensive, irreversible and individual in the case of high-energy particles and stars (depigmentation, neurone deterioration).

Such research is made difficult by the small dose rate from G.C.R. and by the short duration of the flights. The studies will continue, particularly in regard to the effect of the heavy ions. It is difficult at the present time to formulate definitive conclusions.

3.2 Experiments using Rockets

Rockets containing mushroom spores, *Drosophila*, mice and monkeys were launched in the USA in 1946, 1947, 1950 and 1952 and reached a height of 100 km. No definite conclusions could be drawn, as most of the animals died.

These experiments were subsequently resumed in America from 1958 to 1962. By the use of ballistic rockets it was generally possible to achieve heights of 500 km and flights of an average duration of 15 minutes. The animals recovered continued to behave normally. But the exposure period was too short for assessing the biological effect of cosmic radiation. Almost no radiobiological data were obtained.

3.3 Experiments using Satellites

3.3.1 Russian Experiments^{15,17,18}

The Russians directed their main attention to a study of the overall effects of cosmic flights and then attempted to isolate the effect of the various flight factors concerned by comparing the results with those obtained from reference samples on the ground. The Americans carried out better orientated experiments, using balloons and satellites and making physical correlations.

The tests covered various forms of life, from DNA molecules to man himself:

- physicochemical and immunological changes in DNA suspensions: no results;
- inactivation of viruses, bacteriophages;
- occurrence of auxotrophic mutation in bacteria (contradictory results, never significant);
- changes in survival time and in mitotic index;
- mitotic anomalies in Hela, Krebs and Ehrlich cells (results not significant);
- induction of lysogenous bacteria. In principle, this was a valuable test since it was sensitive to 200 mrad. No substantiating results were obtained, since there was no physical correlation;
- exposure of yeast, seaweed (chlorella), mushroom spores (results not substantive);
- *plants*: the Russians carried out several experiments but without achieving any readily useable results. In the discussion of these results there was in fact no mention of the part played by cosmic radiation, weightlessness or vibration. The conclusion can merely be drawn that plants from exposed seeds grew more vigorously than others. There were also mitotic abnormalities in the development of the radicles:
 - chromosomal bridges;
 - rupture of chromosomes through non-disjunction at the time of mitosis (possibly due to vibration).
- *insects*: drosophilae and weevils in egg, larval, pupal and even adult form were used for the various experiments. The results were highly inconsistent and the authors were unable to form any overall conclusions. The drosophilae were difficult to use in such experiments as they are sensitive to very small temperature variations and to vibration.
- *creatures of higher order*: in spite of the advances in astronautics, these experiments provided little information on the effects of cosmic radiation. The first biological subject carried by satellite was the female dog Laika (1957). During the flight which lasted for seven days no effect of cosmic radiation was detected, but the dog was not recovered.

The female dogs Belka and Streika, examined immediately after the flight, and then again some time afterwards, were still absolutely normal. Other American and Russian flights involved dogs, rats, mice and guinea pigs. The clinical and biological examination did not provide a great deal of information. The genetic effect of cosmic radiation was studied, in particular during the Vostok II flights, with the following interesting results being noted:

- the frequency of the chromosomal aberrations in the bone marrow and the spleen of the mice;
- a small increase in the frequency of the dominant and recessive lethal mutations of the genes.

On two parent strains of drosophilae, unfortunately, the Russian authors found the same results after subjecting the biological specimens to vibration.

3.3.2 European Research

European investigators (French and German) took part, under the sponsorship of the Working Group on Space Biophysics of the Council of Europe, in the biological experiments carried out in the Apollo spacecraft.

During the Apollo 16 and 17 flights, the Biostack^{1,5} experiments were aimed at studying the individual effects of the heavy ions in primary cosmic radiation on biological specimens in a state of latent life. T.H.Planel, T.P.Soleilhavoup, P.Cuer, R.Kaiser, P.Massue, H.François, G.Portal (France), E.Bucker, E.H.Graul, G.Horneck et al. (Federal German Republic) used the stacking method which consists in placing biological specimens in thin layers between particle detectors, nuclear emulsions or plastics.

The biological specimens included:

- spores of bacillus subtilis;
- seed of arabis thaliana;
- prawn eggs (artemia salina).

H.Planel's experiment demonstrated the damaging effect of heavy ions. There was a very significant reduction in the hatching rate of artemia larvae through which heavy particles had passed as compared with the reference samples. It is important, however, to determine which effects were due to cosmic rays and which effects were the result of other factors (vibration, acceleration and weightlessness), since the eggs which were not affected by heavy particles also showed, though to a lesser degree, a lower hatching rate than the reference samples.

3.3.3 American Research

Professor Tobias and his team at Berkeley have attempted to explain, by ground-based experiments, certain visual disorders observed by the American astronauts^{5,19,28}. During their space missions they experienced a sensation of flashes, spots or streaks of light about once or twice a minute, whether or not their eyes had become dark-adapted. This sensation could be reproduced by exposing the eyes to low or high energy neutron beams, or to alpha particles of an energy of 250 MeV. Tobias felt that these phenomena were due to charged particles induced by irradiation. These particles directly excited the receptive areas of the retina by ionisation, electron excitation or possibly local production of photons. The frequency of occurrence of a sensation of light corresponded fairly well with the flux of heavy ions with $Z \geq 6$ received by the retina.

R.J.Beckman, C.H.Bonney and D.M.Hunter⁴ used fluxes of $0.8/250$ MeV/nucleon varying from 1.3×10^7 particles/cm² (dose of 171 rads) to 5.9×10^8 particles/cm² (dose of 7540 rads). Photographs of the eye-ground of rhesus monkeys were taken before and after exposure (24 hours, 48 hours, 1 week and 5 weeks). The smallest doses produced pin-hole haemorrhage of the retina. With large fluxes acute retinopathy (ischaemic necrosis) appeared. The experiments showed that, although the haemorrhage regressed with time, the necrosis remained permanently. A single heavy ion seemed capable of inducing a pin-hole haemorrhage of the retina. Several assumptions have been made in regard to the effect of heavy ions on nerve tissue:

- rupture of the intracellular lysosomes and evacuation of hydrolytic enzymes into the cell;
- destruction of the accompanying vascular cells (gliovascular apparatus);
- direct destruction of the neurone structures.

Haymaker et al.¹⁷ put mice (*perognathus longimembris*) aboard the Apollo 16 and 17. They observed small changes in the tegmenta at the top of the skull, corresponding to the tracks of heavy particles of class M or H, which took the form of small necrotic areas in the epidermis or the sheath of the hairs, accompanied by a slight localised inflammation of the derm. Other areas showed small degenerative changes in the muscles of the skin. The results of the histological study of the brain of these animals have not been published.

4. CONCLUSIONS

The various experiments carried out to date have advanced our knowledge of the biological effects of cosmic radiation, although many problems still remain to be solved, in particular the method of measuring the radiobiological risk involved.

First, there is no doubt that such radiation has an activation effect on biological mechanisms which can be considered as beneficial. This is the characteristic of the cosmic radiation which reaches the Earth naturally. Although this is modified by being passed through a metal shield, it can produce somatic mutations and an abnormal increase in cell development. In both cases, galactic cosmic radiation can be regarded as a homogeneous radiation, the irradiation doses of which can be measured in rads by the usual methods.

At high altitudes and particularly in space, cosmic radiation can be considered, from the radiobiological viewpoint, as being composed of two types of elements:

- the greater part is formed of simple particles and electromagnetic radiation, which together constitute a homogeneous environment measurable in rads;
- a smaller part (1%) is made up of heavy particles of very high energy, the effect of which is more difficult to analyse and to measure.

The biological effects of heavy ions and stars are complex. The lesions which occur depend on the kind of tissue traversed, the charge of the particle and its velocity. Each particle has an individual effect which varies according to the point on the track considered and the radial distance from the axis of the track. The damaging effect is severe at the centre of the track and then decreases rapidly. It reaches its maximum near the end of the track (Bragg peak). It is also necessary to take into consideration all the nuclear interactions which occur along the path of the particle and which produce localised changes wherever stars have formed. This non homogeneous radiation cannot be measured by the methods applied in conventional radiobiology, since the actual dose received close to the track of the particle is enormous compared with the dose per gram of material traversed. For example, an X-ray dose of 300 000 rads had to be used to prevent the hatching of an egg of *artemia salina*. As measured by the usual methods, the dose required to produce the same effect in the Apollo missions was of the order of a few millirads and 650 millirads with oxygen or carbon ions of 250 MeV/nucleon in the Berkeley accelerator. The same conflicting results were found in investigations on cerebral tissue and the retina. This particular hazard of heavy ions is not a cause for concern in flights at altitudes below 25 km, but could become significant in space flights of long duration.

SELECTED BIBLIOGRAPHY

It was not possible to include an exhaustive bibliography in a Report of this size. A choice of references has been made to supplement the review paper presented here.

1. — The French Space Programme. Report to the COSPAR Seventeenth Assembly, Sao Paolo, June 1974, pp.113-120.
2. Atlan, H. *Effets Biologiques des Particules Lourdes.* Rev. Méd. Aéro, Vol.5, pp.45-57, 1966.
3. Atlan, H.
Deltour, G.
Pfister, A.M.
Kaiser, R. *Problèmes Actuels Posés par les Radiations Cosmiques au cours des Vols à Haute Altitude. Expérimentation sur les Effets Biologiques des Ions Lourds.* Bull. Docum. Méd. de l'Air, Vol.14, pp.25-28, 1966.
4. Beckman, F.N.
Bonney, C.H.
Hunter, D.M. *Funduscopy Alterations in Rhesus Monkeys induced by Exposure to Heavy Ions (O^{+8}) 250 MeV/Nucleon.* Aerospace Med., Vol.45, pp.154-160, 1974.
5. Bucker,
Schopper, E.
Reinholz, E.
Planel, H.
Soleilhavoup, J.F.
François, H.
Portal, G.
21 co-authors *The Biostack Experiments I and II Flown on Board Apollo 16 and 17.* 21st International Congress of Aerospace Medicine, 17-21 September 1973, pp.106-110.
6. Budinger, T.F.
Lyman, J.T.
Tobias, C.A. *Visual Perception of Accelerated Nitrogen Nuclei Interacting with the Human Retina.* Nature, Vol.239, No.5369, pp.209-211, 1972.
7. Buttner, K. *Radiation Effects on Man in Space.* Bull. Am. Meteorological, Vol.32, pp.183-185, 1951.
8. Chase, H.B. *Cutaneous Effects of Primary Cosmic Radiation.* J. Aviat. Med., Vol.25, pp.388-391, 1954.
9. Chase, H.B.
Straile, W.E.
Arsenault, C. *Heavy Ion and Millibeam Irradiation of Mammalian Tissues.* Aerospace Med., Vol.32, pp.921-924, 1961.
10. Curtis, H.J. *The Use of a Deuteron Microbeam for Simulating the Biological Effect of Heavy Cosmic Ray Particles.* Rad. Research, Suppl.7, pp.250-257, 1967.
11. Curtis, H.J. *The Interpretation of Microbeam Experiments for Manned Space Flight.* Rad. Research, Suppl.7, pp.258-264, 1967.
12. Eugster, J. *Method for Demonstrating the Biological Effectiveness of Cosmic Radiation at High Altitude.* J. Aviat. Med., Vol.24, pp.222-226, 1953.
13. Eugster, J. *Die mutagene Wirkung der kosmischen Strahlung in menschlichen Gewebe (Epidermis).* Archiv der Julius Klaus Stiftung, Vol.38, pp.94-110, 1963.
14. Eugster, J. *Zur Frage der somatischen Spontanmutation.* Archiv der Julius Klaus Stiftung, Vol.41, pp.1-116, 1966.
15. Gyurdjian, A.A. *Sur l'Action Biologique des Radiations Cosmiques.* Satellites artificiels de la Terre, USSR, Vol.12, pp.77-104, 1962.
16. Haymaker, W.
et al. *Brain Study in Balloon Monkeys Exposed to Cosmic Rays.* Aerospace Med., Vol.41, pp.989-1002, 1970.
17. Haymaker, W.
et al. *26 Biocore Experiment.* NASA, Apollo 17 Preliminary Science Report (26.1-14), 1974.

18. Langham, W.H. *Radiobiological Factors in Manned Space Flight*. Report of the Space Radiation Study Panel of Life Sciences Committee. Space Science Board, National Academy of Sciences. National Research Council, Washington, DC, 1967.
19. Mac Nulty, P.J.
Pease, V.P.
Pinsky, L.S.
Bond, V.P.
Schimmerling, W.
Vosburgh, K.G. *Visual Sensations Induced by Relativistic Nitrogen Nuclei*. Science, Vol.178, pp.160-162, 1972.
20. Pfister, A.M.
Deltour, G.
Atlan, H.
Kaiser, R. *Méthode Expérimentale pour l'Etude des Effets Biologiques des Ions Lourds du Rayonnement Cosmique Primaire sur les Bactéries*. 15th International Congress of Aerospace Medicine, Prague, October 1966.
21. Pfister, A.M.
Delahaye, R.P. *Dangers Présentés par les Ions Lourds du Rayonnement Cosmique pour les T.S.S.* Rev. Med. Aéron., Vol.6, pp.33-34, 1967.
22. Pipkin, S.B.
Sullivan, W.N. *A Search for Genetic Change in Drosophila Melanogaster Exposed to Cosmic Radiation at Extreme Altitude*. Aerospace Med., Vol.30, pp.585-598, 1959.
23. Planel, H.
Soleilhavoup, J.P.
Tixador, R.
Giess, M.C.
Croute, F. *Mise en Evidence d'un Effet Biologique de Stimulation des Radiations Ionisantes Naturelles*. ASMP Meeting, Luchon, 27 Sept-1 Oct 1971. AGARD CP 95, pp.C5-1 to C5-11.
24. Simons, D.G. *Biological Effects of Primary Cosmic Radiation*. Proc. VII Internat-Astronaut. Congr., pp.381-400, 1956.
25. Simons, D.G. *Biological Hazards of Space Radiations*. Med. Physics, Vol.III, The Year Books, 1960.
26. Simons, D.G.
Hewitt, J.E. *Symposium on Aerospace Radiobiology. VII - Review of Biological Effects of Galactic Cosmic Radiation*. Aerospace Med., Vol.32, pp.932-941, 1961.
27. Tabusse, E.M. *Contribution à l'Etude des Problèmes Radiobiologiques Posés par les Rayonnements Extraterrestres*. Thèse Med., Paris, 1964.
28. Tobias, C.A.
Budinger, T.F.
Leith, J.T.
Mamoon, A.M.
Chapman, P. *Visual Phenomenon Induced by Cosmic Rays and Accelerated Particles*. ASMP Meeting, Luchon, 27 Sept-1 Oct, 1971. AGARD CP 95, pp.C6-1 to C6-11.

RADIOBIOLOGICAL PROBLEMS OF HIGH ALTITUDE FLIGHTS (BELOW 25 km)

by

Col. R.P. Delahaye, MC, FAF
Hôpital Bégin
94160 St. Mandé, France

and

Group Capt. D. Sturrock, MC, RAF (Retired)
formerly of the RAF Institute of Aviation Medicine
Farnborough, Hampshire, UK

1. INTRODUCTION

Apart from interceptor fighters, transport aircraft and some reconnaissance flights, all military operations take place at low altitude. However, the possibility must be recognised of the development of high altitude offensive and defensive tactics in view of the vulnerability of low-level aircraft (as demonstrated by the extensive use of rockets during the latest Arab-Israeli war). The introduction into service of supersonic transports, and of Concorde in particular, has led to an evaluation of the altitude band between 15 and 20 km. The information gained facilitates discussion of the radiobiological effects at altitudes below 25 km.

Aircrew will be subjected to various forms of irradiation:

- small doses of galactic cosmic radiation (GCR);
- large doses from solar flares;
- exposure to heavy ions.

2. GALACTIC COSMIC RADIATION AND AIRCREW

At altitudes below 25 km, aircrew will be subjected to irradiation from galactic cosmic rays of less than 1.5 rem a year, taking into account the number of flying hours at high altitude (above 15 km). This is a very small dose.

Small radiation doses are considered to be those not exceeding the recommendations of the International Commission of Radiobiological Protection (I.C.R.P.)^{1,3}.

Small doses, by I.C.R.P. standards, are those which produce effects that cannot be detected except by statistical methods applied to large groups.

The most practical method of analysing the effects of small ionising radiation doses consists in assuming a priori that the effect per unit dose is the same as that for large doses. The data for large doses can be analysed statistically. Most methods of this kind permit definition of an upper limit of the risk from ionising radiation. This means to say that it is hardly likely that small doses could incur higher risks per unit dose than large doses.

The following will be considered:

- the risk of radio-carcinogenesis;
- the reduction of life-span due to ionising radiation.

2.1 Risk of Radiocarcinogenesis^{2,3,9,17}

Ionising radiation is capable of inducing cancer. It must be remembered that the aetiology of cancer is complex and that several unknown factors probably contribute to its formation.

The importance of factors such as hormonal state, and the presence of an existing morbid condition (pre-cancerous lesion) give credence to the theory of carcinogenesis according to which there is an "initiator" and a "promoter". With the possible exception of the special case of pre-natal exposure, followed by the incidence of a

tumour in the child, cancer is associated with doses of about 100 rads, with exposure of most of the body or with irradiation of several particularly sensitive tissues. However, in such cases, the occurrence of a radiocancer is by no means inevitable. The indications are that, although ionising radiation may be the "initiator", one or more "promoters" would also need to be present for a tumour to appear.

2.1.1 *Leukaemogenesis*^{2,3,9,17}

The standard example of the relationship which appears to exist between the incidence of leukaemia and previous exposure to ionising radiation is provided by the work of W.M.Court-Brown and R.Doll⁶. Among 13 352 cases of ankylosing spondylitis treated by localised radiotherapy between 1935 and 1954, 36 developed leukaemia.

This rate of leucosis is ten times higher than in the reference population. Leukaemia would appear to result from doses varying between 100 and 3000 R (to the vertebral bone marrow). All these patients had been treated by localised irradiation, but under very varying conditions (absorbed dose, dose rate and distribution of dose). Nevertheless, one cannot exclude the possibility that this morbidity rate may be associated with a more significant predisposition to leucosis. It is equally possible that certain forms of medical treatment may have encouraged the onset of leukaemia.

Disregarding for the moment these possibilities, it should be remembered that the risk of radioleukaemia induced by exposure doses of between 300 and 1500 R to the spinal marrow of male subjects has been calculated at one or two cases per million subjects exposed per year, for a mean exposure of 1 R over a period of 7 years.

A study of the survivors of the nuclear explosions in Hiroshima and Nagasaki (1945) confirms the part played by radiation in leukaemogenesis. A.B.Brill et al.⁵ fixed the risk of leukaemia among the Japanese who were exposed to radiation at doses of between 100 and 500 rads, notwithstanding obvious differences which existed in the conditions of exposure, such as:

- gamma/neutron distribution;
- dose rate;
- time and spatial distribution of dose.

Research on the incidence of leukaemia among children (Stewart^{14,15}) whose mothers had been X-rayed during gestation shows that there is a connection between such exposure to radiation and leukaemia. But other factors seem to enter into the problem: for example, the mother's age or the presence of pulmonary infection^{14,15}. Although Court-Brown and Doll felt that the data available do not allow determination, with any certainty, of the incidence of leukaemia among children whose mothers have been exposed to ionising radiation, it is agreed that the leukaemogenic effect of radiation per rad is ten times greater in the foetus than in an adult. It is thought that leukaemia could result from doses of a few rads during radiodiagnostic examinations.

The currently accepted estimate of the risk of promoting radioleukaemia is 15 to 40 cases per rad per million people for doses of between 60 and 400 rads. The greatest frequency of radio-induced leucosis occurs between 8 and 10 years after exposure. Subsequently the incidence of leukaemia decreases, reaching normal values 25 years after exposure.

J.B.Storer and V.P.Bond¹⁶ noted that there was no agreement between the results of experiments on animals and those on humans in relation to tumours initiated during life in the uterus. It appears that, during their pre-natal life, mice are resistant to the formation of stimulated tumours. There is no suitable animal subject which can contribute to retrospective research related to radiological examination of the pelvis and its effect on children during their pre-natal existence. For many authors, any quantitative estimates of the risk are matters for discussion.

2.1.2 *Other Forms of Malignancies*

It seemed an easier matter to study the relationship between exposure to ionising radiation and the increase in the incidence of cancer.

The research on patients suffering from ankylosing spondylitis who were treated by localised radiotherapy, and on children exposed to pre-natal X-ray diagnostic examinations shows an increase in the rate of all forms of malignant tumours induced by external ionising radiation.

Although it is very difficult to quantify these observations, the I.C.R.P. considers that non leukaemic cancerous tumours are undoubtedly related to doses of several hundreds of rads.

In spite of all the difficulties involved, numerical estimates have been made of the occurrence of lung cancer, thyroid cancer and cancer of the breast.

For lung cancer, the risk is estimated at 10 to 40 cases per rad per million subjects exposed to doses varying between 25 and 300 rads, in the 25 years following exposure.

In the case of cancer of the thyroid, the estimated risk is 40 cases per million subjects per rad.

The estimate for breast cancer is 6 to 20 cases per million subjects per rad.

For thyroid and breast cancer, these estimates are valid for doses varying from 60 to 400 rads and for 25 years following exposure.

When making these calculations the I.C.R.P. point out that the total increase in mortality from such tumours over a period of twenty years following exposure of the whole body to radiation is probably twice that due to radiation-induced leukaemia.

This is the basis of the overall risk estimated at about 40 cases of malignant tumours per million people per year and per rad¹⁷. The significance of this risk in relation to small doses must be considered carefully. It is generally assumed that the risk of cancer per unit dose is the same as that observed at larger doses; there would appear to be a linear relationship between response and dose.

It should be noted that this assumption overestimates the risk from doses that are smaller than those at which the observations were made. The degree of overestimation possibly increases as the dose decreases¹⁹.

Some relevant facts should be added:

- the doses involved are several tens or hundreds of rads;
- high dose rates are more liable to cause cancer than low dose rates;
- a pre-existing illness is a factor which is likely to promote the occurrence of cancer;
- the estimate of 40 cases per million people per rad is possibly too high.

2.2 Reduction of Life-span

Ionising radiation is capable, under certain conditions, of bringing about a reduction in the life-span. The present authors feel that it is particularly important to mention this problem, since it has aroused emotions and been a source of special concern among aircrew. Some radiobiologists claimed at a scientific FAUSST (Anglo-French-US supersonic transport) meeting that an hour of flying at an altitude of more than 15 km would shorten expectation of life by 20 days.

2.2.1 Animal Experiments

A shortening of the life-span in mammals has been observed experimentally. Animals subjected to radiation (mice and rats) were compared with a control sample of animals not so subjected. The existence of the same diseases was noted in both groups, but to a varying extent. Irradiation generally increased the number and the severity of the usual diseases, but it is not possible at the present time to say to what extent the processes of life-shortening due to irradiation are basically the same as those which cause premature ageing. Among rodents subjected to a single dose a shortening of life of 2 to 4% was observed for 100 rads delivered. Female mice are more sensitive than males.

In the case of several separate doses small laboratory animals subjected to small doses over a period of several days showed a shortening of life of the order of 11% for 1000 rads.

A.C.Upton et al.¹⁸ irradiated 15 000 mice of a given breed in conditions of isolation, so as to avoid the possibility of interaction between ionising radiation and pathogenic bacteria. The reference sample was 4000 mice. 3000 were exposed to 10 rads (gamma rays) when 10 weeks old. Preliminary analysis showed that the life of male mice was prolonged by 4 days and that of female mice was reduced by 8 days. Varying the dose rate from 4 rads/day to 80 rads/min did not provide a precise indication of the respective effect of the dose rate. Moreover, account has to be taken of the reduced sensitivity to radiation with age.

In experiments on dogs A.C.Andersen and L.Rosenblatt⁴ exposed them to 100 or 300 rads of X-rays. They observed in this sample that the duration of life was reduced by about 6% per 100 rads. At the University of Rochester, dogs of the same breed were subjected for 5 days a week, during the whole of their life, to small progressive doses of X-rays. Among the dogs which had received 0.06 to 0.120 R/day, the duration of life was slightly higher than that of the control sample.

For a dose rate of 0.6 R/day there appeared to be a reduction of longevity of 5%. The cumulative dose varied with the time of survival of the animals (1000 to 2000 rads). Thus these very high cumulative doses produced a shortening of life equivalent to that observed by Andersen and Rosenblatt after exposure to 100 R at high dose rates.

2.2.2 Human Experiments^{2,3}

A number of organisations (I.C.R.P., National Research Council) have paid particular attention to this problem

but, in spite of a great deal of research, there are still many uncertain factors. In fact, to observe any shortening of the life-span it would be necessary to resort to the examination of human populations exposed to large doses of radiation. If such an effect does actually occur, the groups concerned would be:

- Japanese survivors of Hiroshima and Nagasaki;
- patients suffering from ankylosing spondylitis which has been treated by ionising radiation (localised radiotherapy);
- doctors and X-ray technicians who have in the past been exposed to fairly large doses.

The mortality rate of these groups should be higher than that of a reference population.

The results of research on humans are sometimes contradictory.

- (1) L.Dublin and M.Spiegelman¹⁰ analysed the mortality of various US medical specialists who died between 1938 and 1942 and found that the mortality rate was higher among radiologists. The difference in average life-span varied between 1 and 3 years.
- (2) S.Warren²⁰, analysing the deaths of 82 441 US doctors between 1930 and 1954, established an average life-span of 60.5 years for radiologists and 65.7 years for doctors who did not ordinarily use radiation equipment.
- (3) W.M.Court-Brown and R.Doll⁸ analysed the causes of death of patients suffering from ankylosing spondylitis and treated by localised external radiotherapy. They compared the results obtained with those of the total population. From their observations the number of deaths not due to ankylosing spondylitis or to cancer in the parts of the body subjected to radiation was higher among the patients than in the reference sample.
- (4) R.Seltser and P.E.Sartwell^{12,13} studied the main cause of death among radiologists and compared them with those of members of the Academy of Ophthalmology and Otorhinolaryngology among whom the mortality rate was lower. On the basis of the average age at death, the authors found that the life-span of radiologists was about five years shorter during the period 1935–1944. Then, in the subsequent years the difference decreased. In their conclusions Seltser and Sartwell note conservatively that exposure to ionising radiation can shorten life, but in a non specific manner.

These various researches show to a certain extent a non specific increase in mortality, although other studies do not agree with this view.

- (5) W.M.Court-Brown and R.Doll⁷ have made comparative studies of the causes of death of 1377 British radiologists between 1897 and 1957. They found no difference by comparison with a group of medical specialists who were not radiologists.
- (6) R.W.Miller and S.Jablon¹¹ have done research work covering 18 years on 6500 X-ray technologists in the US Army during the Second World War to see whether they showed a higher mortality rate as compared with a group of pharmacists and chemists. No difference was in fact found.
- (7) The publications of the Atomic Bomb Casualty Commission dealing with victims of Hiroshima and Nagasaki confirm that there is no consistent increase in the death rate due to diseases other than cancer.

J.B.Storer and V.P.Bond¹⁶ note that it is impossible to say why data on reduction of the human life-span are to some extent contradictory, while most of the experimental research on animals does indicate a shortening of longevity.

2.3 Risks of Abnormal Development of the Embryo^{2,3,9,17}

This problem affects women passengers in supersonic transports and also women pilots. In fact, most Air Forces are now considering the possibility of employing women as fighter pilots and as pilots of jet transport aircraft.

The developing embryo is composed of highly radiosensitive tissues. The work of W.Russell shows that the extent of the harmful effects of ionising radiation depends on the stage of embryonic development at the time of irradiation.

If ova which have just been fertilised are exposed to radiation before implantation, a high mortality rate results, but the expectation of life of the surviving ova is normal. The population of non differentiated cells constituted by the not yet implanted embryo can still repair the lesions caused by ionising radiation in certain cells, because of the presence of totipotent (undifferentiated) cells. In other words, there is an "all or nothing" effect. If too many cells are affected the embryo dies. If only a few cells are damaged they can be replaced by further mitosis of the unaffected cells. The development of the embryo then follows its normal course.

If there is exposure to radiation after some cellular differentiation has already taken place, this repopulation (restoration) by the totipotent cells is no longer possible, and various types of abnormal development will then be noted. These are closely related to the stage of organogenesis reached. Thus, disorders in the development of the central nervous system and serious malformation of the limbs (amelia, hemimelia) can occur. In animals this

critical stage of development of the organs is often very short. In man it is between the second and the sixth week of the embryonic phase.

As the development of the embryo continues and organogenesis is completed, the foetus of mammals becomes less sensitive to radiation and increasingly assumes the appearance of an adult. The lethal radiation dose for a foetus during the last three months of pregnancy would also be the lethal dose for the mother.

These findings of foetal sensitivity to radiation and of the possibility of abnormalities in development have led to recognition of the need for prophylactic measures in the radiodiagnostic examination of pregnant women.

However, in the early stage of gestation a woman is often not aware that she is pregnant. If she is exposed to ionising radiation and the foetus dies, the woman concerned may think this is only an abnormality of the menstrual cycle. Many women undoubtedly experience such irregularities in the ordinary way. It is therefore possible that a number of pregnancies pass unnoticed initially and end in the expulsion of an underdeveloped foetus. This fact in itself is abnormal for unknown reasons.

Apart from this early stage of pregnancy, if there is exposure to ionising radiation, the risk to the foetus arising from small doses (of a few rads) is that of malignancies in early childhood. The I.C.R.P. recommends controlling the exposure to ionising radiation of women of child-bearing age so that the dose received by the foetus does not exceed 1 rem during the first three months of pregnancy and a further 1 rem during the remaining months.

This precaution is reflected in the recommendations of the US National Committee on Radiations and Measurements (N.R.C.P.) which has fixed the maximum dose of 0.5 rem for a foetus during the whole of the pregnancy.

2.4 Evaluation of the Risk of Carcinogenesis from Galactic Cosmic Radiation

Galactic cosmic radiation produces dose rates which vary according to altitude, latitude and, to a certain extent, solar activity. However, these dose rates can be considered relatively constant, with variations associated with solar proton events.

The dose rate at an altitude of 25 km will not exceed 2 millirem per flying hour (flight near the Pole during solar minimum).

Assuming that military aircrew will be flying at such altitudes and under such conditions for 500 hours a year, the annual dose equivalent is about 1 rem. For every year of flight, the incidence of cancer during the 25 subsequent years is estimated at 40 cases per million aircrew exposed to these conditions.

The risk of death to airline passengers is 1 in 300 000 flying hours. The same risk for military aircrew, taking one million aircrew flying 500 hours a year, is 1700 deaths, or 40 times the risk of occurrence of radiocancer.

It is recognised that the estimated risk of cancer from doses of the order of 1 rem is made with strong reservations about the validity of its determination. Undoubtedly the risk of radiocancer is underestimated.

3. SOLAR PROTON EVENTS

For present purposes large doses may be considered as those exceeding the dose limits recommended by the I.C.R.P., that is:

- 10 rem for a single whole-body exposure;
- 25 rem for a succession of whole-body exposures.

In space, solar proton events deliver large doses to the skin (one or more hundreds of rads), and sometimes even stronger below the skin.

However, the overlying mass at 25 km alters the proton spectrum, removing the lower energies and reducing the dose rate considerably. For these reasons at 25 km, and even more definitely at lower altitudes, the dose rate very rarely exceeds 100 millirem/hour.

Statistical evaluation of the possibility of whole-body irradiation of operational military aircrew exceeding 10 rem shows this to be so slight that many authors consider that it can be disregarded.

If the dose rate is multiplied by a factor of 10, and if an operational sortie is longer than 10 hours (which is unrealistic), the whole-body dose would exceed 10 rem, assuming that there was a strong possibility of such a solar proton event.

4. HEAVY IONS

Above an altitude of 18 km, the flux of particles of $Z > 2$ (heavy ions) energy loss increases significantly. It is known that such particles produce strong ionisation along their track, which in tissues may reach a diameter of 20 micrometres (size of the cell). The length of the track, which depends on the nature and energy of the incident particles, can vary from a few mm to several cm.

No part of the human organism is out of range. Moreover, there exist along the track interaction stars which are capable of causing extensive damage in their vicinity (experiments on skin and cerebral tissue: Haymaker, Pfister and Nogues). Several authors consider the use of the rad as the unit of absorption to be unrealistic, since it refers to homogeneous radiation and not to particles which have an individual effect.

Some of the affected cells may be destroyed or modified functionally but it is difficult to evaluate precisely the effect of such ionisation on the incidence of tumours or on the risk of death to the individual. It may be felt that this very small destruction of cells could lead to much more serious effects than had been thought. For example, if the fovea is affected, this could lead to partial blindness (scotoma). The same applies to brain damage and in this case account must be taken of the rate of spontaneous destruction of nerve cells, which is of the order of 10 000 neurones a day.

Beckman's experiments on the eyes of Rhesus monkeys (see Paper 2 in this Report by Delahaye and Pfister) have shown that it is possible to observe retinal affections (haemorrhage, necrosis) due to heavy ions 0.8 . Such effects can be found among aircrew. The flux of heavy ions in galactic cosmic radiation is of the order of $10^2 \text{ cm}^{-2}/\text{hour}$. The risk of damage to the retina at high altitude is slight, but its evaluation is still very difficult. The same is true of the risk of exposure of the brain, but there is apparent agreement on the probable greater frequency of superficial changes in the retina.

5. CONCLUSIONS

The risks from irradiation by galactic cosmic radiation and solar protons are very slight. Research on heavy ions is to be continued with the aim of clarifying a number of uncertainties which exist at present.

The question of the effects, or rather of the dangers, of small doses of radiation is still a matter of discussion. It should be recognised that extrapolating from large to small doses most probably results in an overestimate of the true risks. Accepting the I.C.R.P. evaluations, which are the best estimates available, we may conclude that the dangers from exposure to extraterrestrial radiation at altitudes up to 25 km are very slight.

Analysis of the results of various studies does not indicate with certainty that there is any reduction in the life-span of aircrew. Estimates of the incidence rates of radioleucosis or of radiocancer need further consideration.

BIBLIOGRAPHY

1. I.C.R.P. *The Evaluation of Risks from Radiation*. ICRP Publication 7, Pergamon Press, London, 1966.
2. I.C.R.P. *Radiosensitivity and Spatial Distribution of Dose*. ICRP Publication 14, Pergamon Press, London, 1969.
3. Group of authors: *The Effects on Populations of Exposure to Low Levels of Ionizing Radiation*. Report of the Advisory Committee on the Biological Effects of Ionizing Radiation, Division of Medical Sciences, National Academy of Sciences, National Research Council, Washington, Vol.1, 217 pages, 1972.
4. Andersen, A.C. Rosenblatt, L.S. *The Effects of Whole Body X-Irradiation on the Median Life Span of Female Dogs (Beagles)*. Radiation Research, Vol.39, pp.177-189, 1969.
5. Brill, A.B. Tomonaga, M. Heyssel, R.M. *Leukaemia in Man Following Exposure to Ionizing Radiation: A summary of Findings in Hiroshima and Nagasaki and a Comparison with Other Human Experiences*. Annals Int. Med., Vol.56, pp.590-609, 1962.
6. Court-Brown, W.M. Doll, R. *Leukaemia and Aplastic Anaemia in Patients Irradiated for Ankylosing Spondylitis*. Medical Research Council, Special Series, Report 295. Her Majesty's Stationery Office, London, 1957.
7. Court-Brown, W.M. Doll, R. *Expectation of Life and Mortality from Cancer among British Radiologists*. Brit. Med. J., Vol.2, pp.181-187, 1952.

8. Court-Brown, W.M.
Doll, R. *Mortality from Cancer and other Causes after Radiotherapy for Ankylosing Spondylitis.* Brit. Med. J., Vol.2, pp.1327-1332, 1952.
9. Delahaye, R.P.
Sturrock, D. *Vols à Haute Altitude et Radiobiologie, Médecine et Armées, Vol.1, No.6, pp.24-29, 1973.*
10. Dublin, L.
Spiegelman, M. *Mortality of Medical Specialists 1938-1942.* J. Amer. Med. Ass., Vol.137, pp.1519-1524, 1948.
11. Miller, R.M.
Jablon, S. *A Search for Late Radiation. Effects among Men who Served as X-ray Technologists in the US Army during World War II,* Radiology, Vol.96, pp.269-274, 1970.
12. Seltser, R.
Sartwell, P.E. *The Application of Cohort Analysis to the Study of Ionizing Radiation and Longevity in Physicians.* Am. J. Pub. Health, Vol.49, pp.1610-1620, 1959.
13. Seltser, R.
Sartwell, P.E. *The Influence of Occupational Exposure to Radiation on the Mortality of American Radiologists and other Medical Specialists.* Am. J. Epidemiol., Vol.81, pp.2-22, 1965.
14. Stewart, A.M.
Webb, J.
Hewitt, D. *A Survey of Childhood Malignancies.* Brit. Med. J., Vol.1, pp.1495-1508, 1958.
15. Stewart, A.M.
Kneale, G.W. *Changes in the Cancer Risk Associated with Obstetric Radiography.* Lancet, Vol.1, pp.104-107, 1968.
16. Storer, J.B.
Bond, V.P. *Evaluation of Long Term Effects of Low-Level Whole-Body External Radiation Exposures.* Peaceful Uses of Atomic Energy, Proc. Fourth Intern. Conf. Geneva, Sept. 1971, Vol.II, pp.3-12.
17. Sturrock, D.
Delahaye, R.P. *The Effects of Small Radiation Doses.* Concorde Aeromedical Subgroup, 13 pages, July 1972.
18. Upton, A.C.
Randolph, M.L.
Couklin, S.W. *Late Effects of Fast Neutrons and Gamma Rays in Mice as Influenced by the Dose Rate of Irradiation Life-Shortening.* Radiation Research, Vol.32, pp.493-500, 1967.
19. Vennart, J. *Effects of Small Doses of Radiation.* Medical Research Council's Radiobiology Unit, Harwell, 5 pages (unpublished).
20. Warren, S. *Longevity and Causes of Death from Irradiation in Physicians.* J. Am. Med. Ass., Vol.162, pp.464-468, 1956.

PRECEDING PAGE BLANK NOT FILMED

**NON IONISING ELECTROMAGNETIC FIELDS:
ENVIRONMENTAL FACTORS IN RELATION TO MILITARY PERSONNEL**

by

Senior Medical Officer B.Servantie
Research Specialist in the Defence Medical Service
France

and

Captain P.E.Tyler, MC
US Navy
USA

INTRODUCTION

The discovery of electromagnetism dates back to the last century with the work of Harvey, Helmholtz and Thomson. Faraday, and then Maxwell, formulated the theory of the electromagnetic field, a theory which was verified for the first time by Hertz. Subsequently, Tesla, Branly, Lodge and Popov succeeded in transmitting signals from a distance. Finally, with Marconi, radio became a reality.

The first remote detection experiments began in 1904. The first practical achievements did not, however, materialise until 1937 at Le Bourget aerodrome, although Tesla had described radar, but without using this word, in 1917.

Radar, as we know it today, was developed during the last World War, and its use has since undergone an almost exponential expansion. Restricted initially to military applications, it has become generalised to the point of being used everywhere: the police use it to measure the speed at which cars are travelling, it gives warning of the approach of intruders etc. Soon, it will be employed in an attempt to avoid car accidents. At the same time, its uses have become many and varied and the number of its applications in industry, medicine, and even in cooking, is mounting daily.

The existence of such generators of electromagnetic radiation poses the question of their effect on living beings, and of the presence of possible dangers. The numerous studies carried out in this field have increased our knowledge of such radiation and its biological effects. Such knowledge is, however, still insufficient, particularly since it gives us a glimpse of the possible ways in which it may be used on living matter, possibilities which will certainly make for considerable progress both in the fundamental understanding of vital mechanisms and the therapeutic treatment of many diseases.

An attempt will be made to indicate the present state of knowledge in this field by reviewing some of the essential physical and technical facts, and then stating what is known about the biological effects of this type of radiation.

Consideration of the pathological disorders found in human beings will lead to a discussion of safety standards and occupational medicine. Finally, the authors will try to indicate the results which may be expected from the developments in current research.

1. BACKGROUND

The earliest studies can be traced back to those of Arsonval¹¹⁵ at the end of the last century. Subsequently, certain researchers, generally working alone, such as Lakhovsky¹¹⁷ or Van Everdingen^{118,119} continued this research. Interest in the biological effects of electromagnetic radiation then moved first of all westwards to the USA and then eastwards to the USSR. Research was no longer undertaken by individuals but coordinated within major programmes.

The most well known of these is the Tri-Service Programme¹ of the Ministry of Defence in the USA, of which Dr Knauf of the USAF was the Director from 1956 to 1960. For the first time a methodical attempt was made to explore a field which was even then proving to be of great importance.

The views and statements contained in this text are those of the authors and cannot be regarded as reflecting the opinions of the Ministry of Defence (F) or of the Navy Department (USA).

Roundabout the same time, a number of laboratories in the USSR^{120,121} also turned their attention to this research work under the direction chiefly of academician Presman and Madame Gordon.

About 1960 the conclusions of these two programmes showed serious disagreement between the American and the Russian results and this was mainly reflected in the safety standards of the two countries.

Later on, there was a general waning of interest, leading to the almost complete abandonment of research in the USA, while several laboratories in the Soviet Union turned to other fields, such as parapsychology.

An investigation into the biological effects of the radiation from radio waves was then begun in France (CERMA⁹ for the French Air Force, followed by CERB^{6,38} for the French Navy), and later on, in other countries. In 1970 NATO decided to draw up its own safety standards. The American Government¹²² launched a new research programme which this time covered not only military personnel but also involved a number of civil administrations. The World Health Organisation became aware of the biological importance of such radiation and organised a large Symposium in Warsaw in 1973 (Ref.3). The European Economic Community decided to provide itself with legislation in this field. In short, electromagnetic radiation was arousing general interest.

2. PHYSICAL REVIEW

Electromagnetic radiation has been studied for some time. It is known empirically by everyone, the prototype being in fact light. Without going into too many details which would be unnecessary for biologists and doctors, a description of electromagnetic radiation must be given, followed by a statement of a number of parameters which make it possible to characterise it. After studying its constitution, it is proposed to review the descriptive parameters, which may be divided into three categories: frequency, modulation and power.

It is essential first of all to exclude ultrasound from our study. This is constituted by pressure waves and not by electromagnetic waves, but a great many people do not appreciate this difference. Electromagnetic waves are so called because they are composed of an electric field E and a magnetic field H , in phase, which are at right angles to one another and to the direction of propagation (see Figure 1). These fields vary according to the same sinusoidal law: they are therefore constantly in phase. Their resultant is Poynting's vector. The frequency according to which their amplitude varies is the natural frequency (or carrier frequency in certain cases), and is related to the wavelength by the following relationship:

$$\lambda = \frac{c}{N} \quad (1)$$

c being the speed of light in the medium under consideration. These fields can be classified within the electromagnetic spectrum by frequency or wavelength. The waves used in radar do not differ in nature from visible light, ultraviolet rays etc. The electromagnetic spectrum (see Figure 2) is continuous, from the very long waves with wavelengths of more than a thousand metres and a frequency of a few hertz, to the gamma radiation, the frequency of which is as much as 10^{24} Hz for a wavelength of less than 10^{-13} cm. This spectrum is roughly divided into two parts: ionising radiation and non ionising radiation.

Ionising radiation has a wavelength which is less than that of visible light and its frequency is therefore higher. Its energy, established according to Einstein's relationship

$$W = h\nu \quad (2)$$

(h being Planck's constant = 6.6252×10^{-34} J.s, and ν being the frequency), is high (see Table I). It is assumed at the present time that the boundary between ionising radiation and non ionising radiation corresponds to an energy of 13.6 eV, or a wavelength of approximately 0.1 micron situated in the far ultraviolet.

On the other hand, the radiation which concerns us here has a wavelength which is higher than that of visible light and a lower frequency; its energy (see Table I) is therefore insufficient for it to have any direct ionising effect. However, such radiation often produces a phenomenon which baffles or causes some concern to those who witness it: fluorescent lighting tubes or neon lamps light up when irradiated by radar radiation. The electric field which is a constituent of the radiation concerned is in this case sufficient to accelerate the free ions in the gas contained in the tube; as the gas pressure is sufficiently low their free path is large enough to enable these ions, when they meet other atoms, to ionise them by impact. This property makes it possible in certain cases to use a neon tube as a detector; the electric field must be fairly intense, that is, the lighting up threshold will be different for a continuous or a pulsed radiation.

In the non ionising part of the electromagnetic spectrum, the ultraviolet, visible and infrared radiation does not concern us. It should be noted in passing that the exactly similar nature of the infrared radiation and the radio radiation has been confirmed experimentally. The radio section of the spectrum has been divided into several frequency ranges (see Figure 3). In practice only the three higher ranges are used in radar. It is generally assumed

that the microwave frequencies are between 300 megahertz and 300 gigahertz, a range which is divided into several bands denoted by the letters P, L, S, etc. Two special frequencies have been assigned by international agreement to industrial, commercial, medical etc., applications: 935 MHz (32 cm) and 2450 MHz (12.5 cm).

Technical progress and increased communications requirements have led to an increase in frequencies. In fact the higher a frequency the greater the density of information which it can carry. The transmission of speech and music requires a higher frequency than the transmission of morse signals (telegraphy); television is even more exacting. At present, the use of satellites for intercontinental communication makes use of frequencies which were formerly employed only for radar.

The choice of such high frequencies for radar is the result of a compromise: high frequencies give a better reflection from obstacles. The shorter the wavelength, the smaller will be the obstacles which can be seen by the radiation. Finally the higher the frequency, the smaller the equipment. On the other hand, the higher frequencies are absorbed to a greater extent by water (ambient humidity, rain), and finally, they are more difficult to produce, since the equipment is more complex and more fragile.

The use of this radiation in conventional radars will require a special modulation. Radar is used to "see" obstacles which are sometimes situated a long way off. This requires the use of a powerful transmitter which supplies signals to a large antenna in order to concentrate the radiation in as small a beam as possible. The wave transmitted will be reflected from an obstacle which is practically never a mirror, and which will therefore send back the energy in all directions. Only a very small fraction of the power transmitted will return to the observer. It must therefore be collected by means of a high gain antenna, which is therefore very large, and fed into a very sensitive receiver. It is rarely possible to have two large antennas close to each other, and the simultaneous functioning of a very powerful transmitter and a very sensitive receiver leads to the immediate destruction of the receiver. This difficulty has been surmounted by using the same antenna for both units. The transmitter functions for a short period producing a pulse, while the receiver is "blind", then the transmitter is stopped while the receiver comes into operation. This radiation is known as pulse modulated (see Figure 4). The term pulsed wave (PW) is also used as compared with continuous waves (CW), such as those used in furnaces. With pulse modulation the carrier frequency is transmitted only during periods of approximately one microsecond, separated by periods approximately 1,000 times longer. It is therefore important to know the duration of a pulse and the period or frequency of repetition (PRF: pulse repetition frequency). In standard radars the pulse duration is generally between 0.1 and 5 microseconds, and the PRF between 100 and 10,000 Hz. These two parameters define the useful range, the blind distance and the resolving power in the axis. In addition there must be a third concept: the frequency of scanning. The aerial in fact moves in order to allow the beam to scan a certain area in space. The movement is generally a rotatory one, or sometimes an oscillating one, and, except for certain radars used for artillery or for missile guidance, the beam does not remain fixed in any one direction.

Two new techniques are changing this situation. More and more use is being made of aeriels with out-of-phase electronic scanning. In this case the aerial is fixed and only the beam moves with much greater speed. There is however one disadvantage for the personnel: It is impossible when looking at the aerial to tell in which direction the beam is pointing. The second technique affects the pulses. These are much longer, their PRF is lower and they are processed when received in order to plot the information which they contain: this is the pulse compression method.

Pulse modulation added to the carrier frequency makes it difficult to determine the energy carried by the beam, and is likely to give rise to some ambiguity. For the engineer the most important factor is the power transmitted. For the doctor it is the power received by the subject. At the transmitter level the simplest case is that of CW transmission: the power of the apparatus can be determined by calculation and measurement. In the case of pulsed radiation (see Figure 5) a distinction must be made between mean power (P_m) and peak power (P_c). The first corresponds to the energy liberated per unit time, e.g., one second. The power will not however be uniformly distributed in this second but will be condensed into the few microseconds making up the total duration of the pulses. It is therefore necessary to define peak power as corresponding to the maximum power at a given instant, and therefore at the top of the pulse, and mean power which can be calculated as follows:

$$P_m = P_c \times \tau \times N \quad (3)$$

(τ being the pulse duration and N , the PRF). In the case of CW radiation, these are identical. For pulsed radiation, peak powers of several megawatts are commonly achieved, with mean powers of several kilowatts.

When the radiation is transmitted in a free space, it carries energy. At a given point in space it is possible to measure or to calculate the quantity of energy present. The power density is then defined at this spot, expressed in W/m^2 or more commonly mW/cm^2 . Here again it must be stated whether this is peak power density or mean power density. This power density can be calculated by the following equation:

$$d_p = \frac{P \times G}{4\pi R^2} \quad (4)$$

P being the power (peak or mean as appropriate) in watts, G the aerial gain, R the distance as compared with the aerial in meters, d_p being expressed in W/m^2 .

It would sometimes be preferable to determine the power actually absorbed by the subject in W or mW per gram. This is unfortunately not always practicable, even in the laboratory, and it is often necessary to be content with measuring the incident power density.

We must now consider what becomes of the radiation when it has left the aerial. There is a general tendency to consider it as a more or less conical projector beam with its apex on the aerial. This is true but only from a certain distance. In the vicinity of the aerial the situation is more complex.

Aerials are characterised by their radiation pattern which describes the shape of the field in the vicinity of the aerial. This pattern shows the existence of side and rear lobes (see Figure 6) in which the power density may be considerable. This therefore explains why personnel can be irradiated without actually being in the centre line of the beam, and even when they are behind the aerial.

In the centre line itself, the wave is actually formed with phase agreement between its constituent fields only beyond a certain distance. Physicists do in fact distinguish three zones (see Figure 7):

- (a) The Fresnel zone within a limit equal to $\frac{D^2}{4\lambda}$, D being the largest dimension of the aerial and λ being the wavelength;
- (b) an intermediate zone between $\frac{D^2}{4\lambda}$ and $\frac{D^2}{\lambda}$;
- (c) the Fraunhofer zone beyond $\frac{D^2}{\lambda}$.

To these limits must be added the Rayleigh distance: this is the distance for which the paths followed by two rays, one from the centre of the source and the other from the periphery, do not differ by more than $\lambda/4$. This distance is approximately equal to $D^2/2\lambda$. It therefore lies in the intermediate zone. According to the authors the region in which the field is constituted, known as the far field, begins either at the Rayleigh distance or at the Fraunhofer zone. In the region closer to the aerial, or the near field, it becomes very difficult to determine accurately the value of the power density. Table II shows that this can sometimes complicate the work of the person responsible for making this determination.

Once it arrives in the far field the radiation will propagate itself in space. As the beam is not cylindrical, the power density per unit area will decrease with the square of the distance (see Equation (4)). It will in addition undergo attenuation which depends on the transparency of the medium at the frequency involved: this transparency decreases in relation to the increase in frequency, and particularly in relation to the water content of the atmosphere, at least at high frequencies. Sea water constitutes a special case which explains the need for techniques other than radar for submarine detection: a coefficient of attenuation of 40 dB (that is 10^4) per metre is assumed.

Finally the radiation reaches the obstacle. It then divides into two: one part is reflected and forms the radar echo, the other penetrates the obstacle. There then emerges a major difference between the engineers and the biologists and doctors. The former are interested in the echo and the latter in the energy which penetrates the obstacle, at least when this obstacle is a living being, essentially a human being.

The fraction of the radiation which penetrates the material depends on the coefficient of reflection (see Figure 8) of the interface:

$$I = I_0(1 - R) \quad (5)$$

This coefficient of reflection depends on the electrical and magnetic properties of the material at the frequency in question (see Figure 9), as does also the coefficient of attenuation of the radiation being propagated in this material: a depth of penetration d is therefore defined, the distance for which the power density is divided by e (base of the neperian logarithms). The power density at a distance x is given by:

$$I_x = I_0 \times e^{-(x/d)} \quad (6)$$

The penetration depth (see Figure 10) decreases very rapidly when the frequency increases: for example, in the blood it increases from 0.78 cm at 3 GHz to 0.15 cm at 10 GHz.

To conclude this chapter mention must be made of a risk which is not associated with microwave radiation. For the production of waves, the tubes used require high electrical voltages. Account must therefore be taken of the possible production of X-rays at certain points. Generators using semiconductors (Gunn, Impatt diodes, etc.) do not present the same risks but are much less powerful.

3. BIOLOGICAL EFFECTS OF MICROWAVE RADIATION

The main characteristic of the electromagnetic waves used in radar is that they are reflected from obstacles. It has been seen previously that only a fraction of the radiation was reflected, and that the remainder penetrated the material concerned. The presence of this radiation inside living material can be of interest to biologists only to the extent to which there is any interference between the field and the vital mechanisms.

The numerous works devoted to this problem throughout the world have shown that such interference does in fact exist. However, a controversy still reigns in regard to the mechanisms involved.

The results obtained in the USA from the Tri-Service Programme^{1,2} examined the effects on living organisms of the heat given off in situ by microwave radiation. These heat effects are the most obvious ones: one has only to put one's hand in front of a horn which is emitting a radiation of a few watts to feel that it exists. During the same period the work carried out in the USSR^{120,121} showed the existence of other effects, not apparently due to the liberation of heat. For more than 10 years there has been general disagreement over the existence or otherwise of these latter effects, which have been described as "specific" or "non thermal". We shall return to these two types of biological effects later on, but have tried to show here that the controversy frequently arose from inadequate understanding of the phenomena involved. An analysis has been made of about fifty articles from various sources reporting experimental results and arriving at the conclusion either that effects of a non thermal origin do exist or that there are no such effects. They have been plotted on a diagram (see Figure 11) in relation to the incident power density and the duration of the irradiation. Each result is accompanied by a sign (+) or (—), according to whether the conclusion referred to the existence (+) or the non existence (—) of non thermal effects, and by its reference number in the Bibliography.

It would appear from the results that the (—) signs are grouped in the upper lefthand quadrant, corresponding to high power densities and short periods of irradiation. Inversely, the (+) signs are to be found in the lower righthand quadrant, corresponding to low power densities and long periods of irradiation. Only six articles appear in the lower lefthand quadrant, where low power densities are associated with short pulse widths.

The boundaries between the four quadrants are obviously impossible to determine accurately. They can, however, be estimated at 20 mW/cm² for the power densities and at 24 hours for irradiation periods, such numerical values being taken merely for purposes of illustration.

One conclusion is clear: the two types of articles do not talk about the same thing; the existence of the controversy to which reference was made above is then inevitable, but to no purpose. It is difficult to explain the disparity between the two sets of results. Four assumptions are possible:

- there is a necessary minimum irradiation period for non thermal effects to appear, irrespective of the incident power density. In such case, at high power densities the thermal overload to which the experimental animal is subjected would prohibit the extension of the irradiation period for a sufficient time;
- the time at which non thermal effects appear is dependent on the power density. In this second case, the existence of an appreciable thermal effect would hide the non thermal effects which would then be prevented from developing;
- the non thermal effects exist only at power densities below a limiting value. Above this value, the mechanisms would be inhibited and the effect would no longer appear;
- non thermal effects use different mechanisms, the acute effects in the lower lefthand quadrant being different from the chronic effects in the lower righthand quadrant.

As a general rule, the usual terminology describing the biological effects due to microwave radiation as "thermal", "non thermal" or "specific" would not appear to have other than a practical advantage. In this sense, one of the conclusions of the Symposium held in Warsaw by the World Health Organisation³ seems of considerable interest. It distinguishes three power density ranges: a high range — more than 10 mW/cm²; a low range — less than 1 mW/cm², and an intermediate range — between 1 and 10 mW/cm². On the diagram in Figure 11, the upper lefthand quadrant would correspond to the first range, with the boundary then being slightly under about 20 mW/cm². The lower half would correspond to the other two ranges since the boundary between the intermediate range and the lower range cannot be shown in the diagram.

It is also essential to define precisely the meaning given to the adjectives "thermal" and "non thermal", if it is desired to continue using them. A practical definition is to attribute the word "thermal" to any effect which is reproducible by a means other than microwave radiation, the word "non thermal" then being reserved for effects not reproducible in this way. Many other definitions are, however, possible.

In spite of the critical comments just made about these words, we shall continue to use them in this Paper because they are in general use.

4. EXPERIMENTAL THERMAL EFFECTS

A study will now be made of the experimental biological effects for which the release of heat in the tissues would appear to be the mechanism through which radiation acts.

The very many works devoted to this type of effect have shown the importance of the frequency: the higher frequencies are absorbed in the first few millimetres, mainly through the skin, while the lower frequencies penetrate more deeply. After penetrating the tissues, the electromagnetic energy^{102,103} is converted into thermal energy by means of two mechanisms: ion conduction, and primarily, excitation of the dielectric relaxation of certain molecules, particularly water molecules.

This conversion to thermal energy may occur either in the organism as a whole, during general irradiation, or in certain viscera during localised irradiation. General irradiation⁵³, at high power densities, leads to the death of the animal through hyperthermia. The central temperature rises and may become temporarily stable as long as the thermolytic mechanisms have not been exceeded; when these mechanisms yield, the temperature again begins to rise until it reaches a lethal value. If the quantity of energy is too high at the very beginning, there is no stabilisation period and the internal temperature rises until the animal dies, or rather, until the gain and loss of heat are in equilibrium: this amounts to a kind of "cooking" of the animal. Hyperthermia caused in this way is accompanied by various phenomena such as salivation, behaviour indicating a desire to escape, convulsions etc.

Localised irradiation of the head²⁸ may produce similar manifestations. The head is in fact an organ which is very sensitive to any increase in temperature. Other organs are also particularly sensitive, for example the testicles²⁷, which may exhibit all the stages of a lesion up to the point of burning, after exposure to high power densities.

The exposure of pregnant females⁶⁶ to a power density of more than 100 mW/cm² may lead to the occurrence of foetal malformations of various types.

In the case of lower power densities, the animal reacts to the extra heat by more or less prolonged disorders of its cardiovascular and respiratory parameters.

At the skin level an anaesthetic effect² has been described in an animal which was irradiated, while under an anaesthetic, with a high frequency radiation (10 GHz) and a power density of 200 mW/cm²: the skin temperature was estimated to be 45°C, a temperature which was sufficient to cause sensations painful enough to awaken the animal.

Irradiation of the eye has been studied by numerous researchers⁸⁶. Because of its lamellar structure and its type of vascularisation, the lens of the eye is particularly sensitive to heat. A number of papers have been written examining the formation of cataracts following irradiation, depending upon the frequency and the period of exposure. Localisation of the lesions appears to be related to the frequency, becoming increasingly anterior as the frequency increases. The existence of a power density threshold has not been clearly established, nor that of any cumulative effect.

The common characteristics of all these studies is that they use high power densities and are related to the mean power density. They are too numerous to permit an analysis of them all, and the reader is referred for further details to the almost exhaustive reviews which are available.

5. EXPERIMENTAL NON THERMAL EFFECTS

This type of biological effect is surrounded by a much greater degree of mystery than the preceding type. It is also the more interesting of the two types. We have seen that it was responsible for an international controversy which has not yet been resolved. It raises in fact several questions. The first of these relates to the existence of such effects: Is microwave radiation responsible, or not, for biological effects in a range of power densities for which there is only a very small liberation of heat? As far as the authors are concerned, their own experimental results lead them to reply in the affirmative^{73,104}. Next come questions about the nature of these biological effects and the nature of the mechanism or mechanisms through which such effects are caused by electromagnetic radiation. These are questions for which it is very difficult to find an answer both because of the very large number and the diversity of the effects described, and because of the lack of theoretical and experimental data. At the present time, and with very few exceptions, it is merely possible to formulate assumptions.

Some of these effects have been studied from the biophysical angle¹²³ and their mechanism is at least partially known: e.g. the phenomenon of the strings of pearls, the orientation of asymmetrical structures and the electro-magnetic pump.

When subjected to a sufficiently intense electromagnetic field in a fluid medium, small size particles, of the order of a few microns, form themselves in the medium into fairly long lines. This phenomenon has been studied

in the case of polystyrene or silicone particles, bacteria and erythrocytes. The theory which explains this phenomenon is based on interaction between the field and the electrical dipoles and is in good agreement with experimental findings.

If the particles are asymmetrical, their major axis is oriented along the field. The electric field required is weaker than for the strings of pearls. This orientation is probably due to ion currents induced in the medium.

Finally, when a field is applied between two non parallel linear electrodes, a pump phenomenon occurs and the particles are expelled through the narrowest end. In this case the phenomenon arises from inhomogeneities in the field.

In the three cases quoted, obtained *in vitro*, it was possible to formulate a new theory, or to adapt an already existing theory to explain the phenomena. This is unfortunately not so in the case of the following examples containing the results of experiments on an animal; contradictions are frequently found between the experimental facts and the assumed theory.

A very large number of biological effects are found in an animal exposed to low power densities, generally less than 10 or even 1 mW/cm². It is impossible to describe them all in detail, and general reviews or books which do describe them are already available. The discussion here will be confined to a few examples, a particular attempt having been made to choose those for which there is an explanatory assumption, whether true or false.

One of the most well known examples is the fact that it is possible to 'hear' certain radars⁴⁹. With his head in line with the beam, a subject perceives a sound the frequency of which corresponds to the PRF. There are two opposite theories in regard to this phenomenon.

- the earlier theory¹²⁴ is based on direct action of the radiation on the cortex, producing an excitation of the neurons in the temporal region which react by perceiving a sound. This theory is supported by certain arguments, either experimental ones, such as the fact that perception disappears if the temporal region is masked but not if the mask is in front of the ear, irradiation being lateral, or theoretical arguments, by determining the peak power density thresholds at various frequencies and calculating that the values become equal at the cortex;
- the more recent theory¹²⁵ explains the phenomenon by thermal expansion of the endolymph caused by each pulse, the expansion thus produced being capable of exciting the cochlea and therefore resulting in the perception of a sound.

In the author's view the following experiment suggested by Frey but, so far as is known, not yet carried out, may provide a means of deciding whether to adopt one or other of these theories. The experiment consists in creating in animals a reflex conditioned to this sound, and then making them deaf by destroying the cochlea or section of the 8th pair: if the animal reacts to the stimulus, this can be only as a result of direct action on the cortex. If there is no reaction, the action takes place at the level of the inner ear. Although apparently simple this experiment is in fact a complicated one to perform.

A series of studies of Canadian origin^{127,128} is investigating the effect of microwaves on birds in flight (parakeets) and on the ground (hens). A number of disorders have resulted relating mainly to behaviour, neuro-muscular functioning and balance. It appears from these studies that feathers behave like highly sensitive wave detectors. The bird, which is capable of detecting very weak electromagnetic fields, apparently reacts abnormally to the artificial field to which it is subjected, a field whose intensity, although low, is higher than that of the natural fields found in nature.

In another study¹¹⁰, again concerned with hens, irradiation with a power density of 1 mW/cm² produced a distinct increase in the number of eggs laid. This increase in laying was however accompanied by a doubling of the mortality rate.

The central nervous system (CNS) is an organ which is particularly sensitive to microwave radiation and it would be a difficult task to count the number of studies which have been devoted to this throughout the world, in spite of serious methodological difficulties. For example, it is impossible, for theoretical reasons, to place electroencephalogram recording electrodes on an animal which is being irradiated: the metal focusses the electromagnetic field and the latter may reach very high values which are practically impossible to determine but which are very much higher than the incident field.

The authors⁸⁴ irradiate animals but attach the electrodes only after completion of the period of irradiation. They have shown the existence of serious disorders, of the paroxysmic outburst type, with spikes and spike waves. These disorders, found with a pulsed radiation of 3 GHz for 5 mW/cm², occurred again with the same power density at 2.45 GHz, CW, and for 0.7 mW/cm² with a pulsed radiation of 9.4 GHz.

Several authors have shown changes in the EEG⁶⁹ recorded on various animal species for different types of irradiation. The modulation carried by the radiation has been shown to produce an effect. The authors themselves⁷³ have found the PRF from a frequency analysis of the EEG. The disorders do not occur in isolation but are accompanied by changes in the movement of the calcium in the head¹²⁹.

The central nervous system does not react only at the EEG level: changes also occur in the behaviour of the animal⁶⁶. This is a difficult field of study. Soviet researchers⁶⁷, following Pavlov's ideas, have devoted numerous works to conditional reflexes, the occurrence and disappearance of which are affected by irradiation.

The large number of studies on the effect of microwave radiation on the central nervous system have produced difficulties, especially since the observations made show the resultant of numerous processes, several of which may be disturbed by the electromagnetic field.

One example of this is provided by the cardiovascular reactions to irradiation. The literature^{32,130} is rich in cases showing variations in blood pressure, cardiac rhythm etc. It would appear, however, from these works that the source of such variations is the neurovegetative system in which the most important agents are the heart and the blood vessels. As previously noted, a painful stimulus is liable to occur in the peripheral nervous system. Such a risk does not, however, seem to be very great during irradiation over a long period – several weeks to several months – if the power density is low.

It is impossible in this list of examples not to mention also the studies showing hormonal⁷², blood²², biochemical etc. changes. Changes in certain biological rhythms⁷⁵ have been observed, as well as mitotic changes⁴¹.

While the majority of experiments are conducted by irradiating the whole of an animal, some are carried out on other experimental subjects, with interesting results. Thus Webb^{113,114} has shown the selective absorption of certain very high frequencies, roundabout 70 GHz, by bacteria, which has affected growth. This work has been confirmed quite recently¹³¹.

As this lengthy enumeration shows, the effects of microwave radiation vary widely. With a very few exceptions, such effects are found only after long periods of irradiation, most frequently for periods of more than a week and up to several months.

As has already been said, it is not easy to give an overall picture. Certain facts can, however, be noted:

First of all, the disorders caused by low level microwaves are more functional than organic, or possibly functional and then organic.

Very often, and the authors have noted this not only in their own work but also in connection with other results, the difference between animals which have been irradiated and those which have not been subjected to radiation is shown only by an additional factor: irradiation alters the manner in which an animal reacts to an external stress or agent.

Finally, the experimental results are attributed to the effect of extremely high frequencies (or microwaves or any other synonym). These terms are general ones and denote a group of electromagnetic waves which often differ considerably from one group to another. Now, it is becoming increasingly certain that the large number of effects found after low level irradiation are due to several different mechanisms, some related to the carrier frequency, and others to modulation etc.

One of the reasons which make it so difficult to give an overall picture of these effects probably lies in the fact that an attempt is being made to put things which are different into the same framework. For the purpose of categorising the various types of effects, it could be said that some effects are due to microwave radiation in general, or possibly to an even wider frequency range, and could be described as 'general' effects. A second type, related to the carrier frequency, apparently occurs only in a narrow frequency band, and finally, a third type, which depends on modulation, could be combined with the two previous types, resulting possibly in the occurrence of synergy or inhibition. This method of illustrating the effects takes into account apparent oppositions, for example between a result obtained with a pulsed wave radiation of 3 GHz and another result obtained with a CW radiation of 9 GHz.

This assumes that the energy carried by the electromagnetic field does not play a direct part, as in the case of thermal effect, but acts by disturbing or orienting certain vital mechanisms in a cell. Research into the cell and its mechanisms has begun on a chemical basis. The physical aspect of these systems has been under investigation for several years, and has shown the important part played by intracellular structures, particularly the membranes, and by the electrical phenomena which take place at this level.

Much still remains to be discovered, however, in this field and it is possible that mechanisms which carry information from cell to cell or within the same cell are more sensitive to interaction with electromagnetic waves than is felt to be the case at present. This interaction could be manifested either as additional sound, or as extra

information on top of the information already in the system. In the latter case, the carrier frequency would serve only to carry this information to the cells. In the light of present cybernetic knowledge¹³², the quantity of energy required for such interference is conceivably smaller than for a direct effect.

Other attempts to explain these effects are also possible, based on more conventional theories. For example, the complexity of biological structures and the resulting inhomogeneities in the electromagnetic field may give rise to micro thermal effects leading to biological disturbances.

It is clear that there is insufficient knowledge in this field and that a great deal of work still remains to be done.

6. HUMAN PATHOLOGY

It has just been shown that microwave radiation can penetrate living matter and interfere with its functioning. While making considerable reservations and confining themselves to already established facts, the authors can foresee that similar occurrences are liable to be found in a human being placed in a similar situation. This is particularly true in the case of thermal effects: the electric and magnetic parameters of human tissues differ only slightly, in fact, from those of animal tissues. Microwave radiation which penetrates a human organism will lead to the production of heat the effects of which can be estimated, at least approximately. In the non thermal field much greater care has to be exercised. As it is practically impossible to use a human being as an experimental subject, our knowledge is much less extensive than in the case of animals, where it is already proving inadequate.

The thermal effects demonstrated in the case of the animal can therefore be expected to occur in a human being, with their consequences: generalised hyperthermia, lesions of particularly sensitive organs etc. Account must be taken of the fact that the human being generally has freedom of movement: if he feels a sensation of heat, he can move away from the field. Very often, however, the warning is late. It has been seen, in fact, that microwaves can penetrate, sometimes deeply: if, in the X band, at around 10 GHz, there is almost total absorption in the first few millimetres of skin, in the S or L band, on the other hand, at frequencies of 1 or 2 GHz, the depth of penetration is greater and may be as much as several centimetres. Heat is therefore produced in the deep tissues. Since the heat-sensitive corpuscles are located mainly in the skin, they will be involved only when the heat generated in the underlying tissues has spread to the skin. This is a major difference between microwave radiation and other types of heating. It is thus possible for the warning to be perceived only after the radiation has had an effect.

The dimensions of a human body are also generally bigger than those of laboratory animals, whereas the wavelengths are the same. This prompts us to consider another possibility: the formation of standing waves inside certain organs, such formation being facilitated by the fact, that although there is no change in the frequency of the radiation, its wavelength decreases because of the reduced speed imposed upon it by the characteristics of the biological environment. A radiation of 3 GHz, whose wavelength in air is 10 cm, may thus have its wavelength reduced to 2 cm. Such stationary wave systems may lead to the formation of hot points, which become sources of internal burns.

Finally, it is well known that, as in the animal, the testicle and the lens of the eye are particularly sensitive to heat. Any localised increase in temperature in one of these organs may therefore result in lesions similar to those produced experimentally.

Having seen the possible consequences of exposure to high power densities, an evaluation must then be made of the disorders which actually occur. The impossibility, for obvious reasons, of carrying out direct experiments on a human being has already been mentioned. Two tools are, however, available to doctors in order to make such an evaluation: a study of cases of accidents reported in the literature and the epidemiological survey.

The first method is the least reliable. Quite frequently, an individual with clinical evidence attributed to irradiation by radar, has not previously been examined and given a certificate confirming that he is in good health. The source of the disorders can therefore only rarely be attributed with certainty to radiation, and the doctor must be satisfied with a 'reasonable' doubt, with the risk of error which this implies through lack of objectivity.

To quote the following case reported by McLaughlin¹³³: a technician working approximately 3 metres from an antenna became aware of an unbearable sensation of heat in the abdomen and moved away from the spot where he had been working. During the next few hours peritonitis developed and the subject died eleven days later in spite of several surgical operations.

Without giving any details the same author quotes two cases of infarction of the spleen, with haemorrhage, following severe irradiation.

Rosenthal and Beering¹³⁴ report the case of a young man who, after being exposed several times to intense irradiation, developed oligospermia with infertility, although he had already given proof of his fertility.

The authors of the present paper have seen the case of an engineer who was working one morning on a parabolic aerial emitting X band radiation. When his head became too hot, he moved away from the field in order to cool off. By the end of the afternoon he had a severe headache, followed by a meningeal syndrome sufficiently serious to warrant a period of one month in hospital.

Cases of cataract present the same difficulties of interpretation. Subjects have rarely had any previous eye examination. The occurrence of crystalline opacity in a subject exposed to microwave radiation may therefore always be attributed either to a coincidence due to chance, or to the irradiation itself. In this field, however, it is possible to carry out a survey, comparing a control group with a group which has been irradiated. Several such surveys have been made, but the results have not been sufficiently decisive to convince the sceptics.

To summarise, information about human pathology due to the thermal effects of microwaves is very poor, and clinical cases very rare. Cataracts constitute a special case, since, in spite of the doubts which may be levelled at them, the observations made by certain authors^{83,31} are such that they must correspond to some actual circumstances.

If we now consider the pathological manifestations attributed to specific effects, we are faced with a situation similar to that of the experimental studies. In contrast with the literature of the Western world, Soviet reviews have published a large number of cases of occupational diseases found in technicians who have been working for some time in an electromagnetic environment. The clinical signs are very numerous and cover both the endocrine glands and the cardiovascular or nervous systems. The Soviet School¹²⁰ has described a microwave radiation syndrome which comprises these various symptoms. The syndrome develops in three stages of severity and shows itself mainly through asthenia, headaches, memory disorders and variations in blood pressure.

This syndrome calls to mind a neurovegetative dystonia, a disease which is very widespread nowadays to the point of having been described as a 'disease of civilisation'. It appears to be one of the usual modes of response of human organism to the numerous stresses to which it is subjected by our modern environment. It should, however, be noted that many of its manifestations are similar to those presented by animals which have been irradiated during experiments extending over a long period.

One of the difficulties mentioned previously is again found here: the organism may react in an exactly similar manner to different agents. It thus becomes extremely difficult to attribute to any precise cause among others a particular effect which has been brought to light during an investigation.

Epidemiological surveys may be useful, but, as has been said above, their conclusions are often contradictory according to their origin. Whereas those conducted in Eastern European countries conclude that various disorders do exist, the surveys carried out in the West have led mainly to negative results. Such disparity is probably due to a number of reasons, for example, the criteria adopted for the initial selection, or the prior ideas which led to the decision to conduct the survey. It is possible that the surveys in the Western countries have not been directed towards revealing the phenomena described by the Eastern countries. The difficulties presented by such studies might explain this state of affairs.

A good example of this is provided by a survey conducted in Baltimore¹⁰⁹ into mongolism. This survey has shown incidentally that a larger number of fathers of mongolian children had been exposed to irradiation by radar than normal fathers. The difference was small: 8.7% and 3.3%. The people interrogated had not been selected in relation to this element, the factor under investigation being primarily ionising radiation. It is therefore impossible at the present time to arrive at a definite conclusion that mongolism is connected with the father's exposure to electromagnetic fields. A further survey, for the purpose of studying this factor, would have to be conducted to settle the question.

In the literature of the West, a few elements are nevertheless found which are similar to those described in the East. Thus Doury⁶² reports observation of a man who showed clinical symptoms which do in fact seem to be due to the microwave radiation syndrome referred to by the Russian authors. Miro¹³⁵ has described a decrease in the osmotic resistance of the red blood corpuscles in personnel who have been exposed to radiation during the course of their duties.

Most of the symptoms attributed to microwave radiation are subjective and therefore difficult to demonstrate; perhaps our methods miss the mark and are not very suitable for dealing with this problem. Further studies, based on our improved knowledge, will very probably help us to recognise and identify the disorders which are to be feared during prolonged exposure to microwave radiation. Even so, it is clear that in present working conditions, serious accidents are very rare occurrences.

7. SAFETY STANDARDS

To avoid or limit as far as possible any accidents due to dangerous radiation, certain countries or organisations have formulated safety standards. The earliest standards came from the USA and the USSR, as a result of which

similar action was taken by other countries which thus adopted standards which were either original, or based on the American or Russian systems.

These systems apply to the microwave frequencies proper, for which direct measurements of the power density are possible. The frequencies in question are between two limits which vary slightly from country to country: the lower limit lies between 10 and 30 MHz and the upper limit between 100 and 300 GHz.

The system¹³⁶ most widely adopted in the countries of the West is that designed by Schwan and his colleagues. It is based on the human body's ability to dissipate extra heat produced by radiation and therefore assumes that only thermal effects are involved. This system is based on two threshold values for the mean power density: 100 mW/cm² and 10 mW/cm². Any exposure to a value higher than 100 mW/cm² is prohibited. Between 100 and 10 mW/cm² the exposure time in minutes per one hourly period is calculated according to the formula:

$$t = \frac{6000}{p^2}$$

P being the mean power density in mW/cm². Below 10 mW/cm², there are no restrictions.

To within small differences, these same values have been adopted by other Western countries such as France, Canada, Federal Germany etc.

The adoption of a similar standard for NATO is now in hand.

The USSR has adopted a very different system¹⁶ with very different maximum values. Any exposure to a power density of more than 1 mW/cm² is prohibited. Between 0.1 and 1 mW/cm², a period of 15 to 20 minutes per working day is authorised, subject to the wearing of protective glasses. Between 0.1 and 0.01 mW/cm², exposure must not exceed 2 hours per working day. Below 0.01 mW/cm², exposure may be extended to the whole period of the working day.

Czechoslovakia³⁵ uses a more complex system. This system makes a difference between CW fields and PW fields, and also between a technician and non specialist personnel. In the case of technicians, the maximum permissible power density for an 8 hour working period is fixed at 25 μ W/cm² for CW radiation, and at 10 μ W/cm² for PW radiation. For higher power densities, the authorised period of exposure, in hours, is obtained by dividing 200 (CW) or 80 (PW) by the value of the power density expressed in μ W/cm². In the case of non specialist personnel, the maximum permissible power densities are divided by 10, or 2.5 μ W/cm² (CW) and 1 μ W/cm² (PW), but the period of exposure is increased to 24 hours. For higher power densities the exposure time is similarly obtained by dividing a constant by the value of the power density expressed in μ W/cm²; the constants adopted are 60 for the CW fields and 24 for the PW fields.

Poland⁸⁰ has recently adopted a different system. It fixes a maximum limit for power density at 10 mW/cm² and a lower limit of 10 μ W/cm² below which there are no restrictions on the exposure period. For the intermediate values the period of exposure to the field in hours is calculated by dividing a constant by the square of the power density expressed in mW/cm²; in no case must the period of exposure be more than 8 hours. The novel feature in this system is the distinction made between the standing wave fields and those produced by a rotating aerial: in the first case the constant is fixed at 0.32, and in the second, at 8. The maximum authorised power densities for a period of 8 hours are therefore 1 mW/cm² for a moving field, and 0.2 mW/cm² for a fixed field.

A comparison of these various safety standards (Fig.12) shows clearly the differences between them. It has been seen that the American system was based on theoretical and experimental data which allowed only for the dissipation of heat. The other systems have been arrived at from the findings of epidemiological surveys and experimental results, and take into account primarily non thermal effects. This initial difference in concept is certainly one of the reasons which explain the differences noted. A second reason lies in the basic philosophy behind safety standards in general: in the Western countries the limiting values are fixed in order to avoid the occurrence in a human being of serious or prolonged disorders, with an associated safety factor, and such values must not be exceeded. In Eastern European countries, on the other hand, the limiting values are those which produce the first disorders, even though these may not be serious, and constitute ideal values which one must try to maintain.

There are probably other reasons which are also partly responsible for such differences. It is instructive to note that the two earliest systems are also the ones which show the greatest differences. The Czech system, of more recent date, is a little higher than the Soviet system. The latest system — that used in Poland — is even higher. Conversely, in the USA, the system recommended by the American National Standards Institute, although based on previous standards, is more strict. There would therefore seem to be a tendency at the moment towards standardisation of the various systems. In any case, our present knowledge is still insufficient to provide any degree of certainty in this field and it will be some time yet before we are able to recommend standards which can receive universal acceptance. Such standards will very probably have to take into account not only the mean power density and the exposure time, but also other parameters of the field such as modulation, peak power density etc.

The standards referred to above are exposure standards. They apply to personnel, in most cases military personnel, since there has been some delay in the legislation covering civilian workers. They define the conditions in which an individual can be exposed to a microwave frequency field, without prejudice to the characteristics of the apparatus which produce this field.

They must not be confused with equipment standards, which lay down the specification for a generator and are not concerned with personnel.

Such a system has been made necessary by the multiplicity of generators for industrial or commercial use. While military generators are designed to send out a microwave field in a free space, industrial equipment produces the field in a closed cavity. It is therefore possible to lay down maximum values not to be exceeded by any leaks.

In the USA the Ministry of Public Health has fixed the maximum permissible values for equipment built from October 1971 onwards: when the furnace is sold, any leakage must not exceed 1 mW/cm^2 , measured five centimetres from the wall; thereafter no leakage must exceed a maximum value of 5 mW/cm^2 , measured as before.

As far as the authors are aware, regulations of this kind have not been introduced in any other country, although manufacturers of microwave furnaces are making their equipment in terms of these values.

It is important to bear in mind the difference between exposure standards and equipment standards. They differ completely in their implementation, and also in their results.

9. PROTECTION OF PERSONNEL

To want to protect personnel exposed to microwave radiation assumes that there may be a danger. It has been shown that such radiation could, in fact, prove dangerous in certain conditions because of the thermal effects produced. With regard to non thermal effects the position is less clear. The existence of a biological effect does not always mean that this effect is dangerous and only continual research into a better understanding of the mechanisms involved will be able to provide the answer.

Furthermore, in order to protect personnel, we must know whom to protect³⁹. In this connection there is a concept which is all too often misunderstood: in many cases the personnel exposed to radiation are not those whose duties are concerned with extremely high frequencies. This is so on board ships: their metal superstructures constitute good Faraday cages which protect radar operators working in a room inside the ship. On the other hand, those who are on watch duty on the bridge and sailors working on the deck may be exposed to radar beams without knowing it. The same often applies to aerodromes where runway personnel or control tower staff may find themselves in the field of one of the radars, either accidentally, or even voluntarily, when the radar is being used to monitor traffic on the runway and roads. It is therefore very important, from the point of view of the protection and medical checks of personnel, not to confine one's attention to the single case of the skilled personnel operating the generators.

Protection can be ensured by various means⁴⁶. First of all, the areas irradiated must be determined, that is, a map must be made of the particular areas exposed to the radiation, using calculation resources and measuring equipment. It is then sometimes possible to take some precautions which will reduce a collective risk. In certain cases this is impossible and it becomes necessary to consider individual protection. At all events, a medical examination is essential in order to keep a check on the state of health of the persons concerned, to collect data which are very important for a better knowledge of the effect of these fields on human beings. and finally, to assess the causes to which any effects might be attributable in the event of an accident.

Making a map of the areas exposed to radiation is a theoretically simple problem but one very difficult to solve in practice. The values of the power density at various points in the beam can be predicted by calculation. However, any obstacles located in the vicinity of the antenna may considerably affect these values. The same thing occurs when several aeriels are close to one another. Calculations then very quickly become inadequate and must always be supplemented by measurements of the field, using an instrument which indicates the value of the power density. Such instruments are fairly common nowadays and operate by means of various techniques. They may be fragile and therefore require delicate handling: if used incorrectly, they are liable to give wrong readings and may even become damaged by the field which they are to measure. Their use should therefore preferably be left to a trained technician.

The results of such measurements require critical examination. They often depend on the type of equipment used: extremely high frequencies are in fact polarised and their type of polarisation may vary from transmitter to transmitter. For any given instrument, the response to a field may thus vary accordingly to the sensitivity of the pick-up to various polarisations. This response may also vary according to the frequency, and it is difficult to develop a pick-up which is identically sensitive to all the frequencies in a wide range. If, in addition to the main radiation, there are one or more reflections, or if one area receives several different kinds of radiation, the result of the measurement may give very unreliable values.

The ideal measuring instrument, which should be cheap, portable, not affected by polarisation, frequency, or modulation, and capable of integrating several types of radiation or reflections etc. . . . is not to be found. Instruments which approximate to this ideal have been available for some time.

Another approach to the problem has been made relatively recently. This has taken the form of small flat instruments, with simplified electronics, carrying a bulb or a LED diode which lights up when the field exceeds a certain threshold. Small in size, these instruments are easily carried in a pocket or worn on the lapel of a coat. Unfortunately, the authors feel that they are of limited application. Beischer et al.¹³⁷ have shown that the mere presence of an individual in a microwave field disturbed the instrument by the creation of stationary waves. Although this phenomenon is not too much of a nuisance for the technician using a standard measuring instrument the probe of which can be moved, in the case of the badge it is a latent defect which should debar its being sold. Such an instrument may, on the other hand, be useful in a workshop or a laboratory if used as a fixed or moving beacon. Incorporated in a warning panel, the lighting up of the lamp would give warning of the existence of a field. Such a system would prove useful for any area which was only occasionally exposed to radiation.

Determination of the values of the electromagnetic field in the various areas frequented by personnel may show that in certain areas the values exceed the authorised levels. Two solutions are then possible: to prohibit or limit access – according to the measured level – or to reduce this level. In the first case the areas in question should be marked, and it is always preferable to use a standard form of marking. The standard now being prepared for NATO lays down the characteristics required for the warning signs, which will probably be similar to that shown in Figure 13. If, on the other hand, it is desired to reduce the power density at a particular spot, it is possible to use either boards made of absorbent material, which are effective but expensive, and liable to ageing, or metal reflecting boards. It is even possible to preserve the transparency of windows by using special materials. Metallised mylar for example seems to give good results.

Such collective precautions are obviously of use, but it is also clear that the initial step in this direction must be taken at the time of installation of the aerials which should preferably be located as far as possible from the premises occupied by staff.

In some cases an individual is required to go into a prohibited area or to remain in an area for a limited period of time. On such occasions it is theoretically possible to protect him by giving him protective clothing. Such garments are being investigated in several countries¹³², although, as far as the authors are aware, very few of those designed and developed so far are actually of any use. Indeed, it is difficult to make a garment which is usable – and hence flexible, ventilated and capable of eliminating the heat given off by the individual – which provides protection, allowing only a fraction of the incident radiation to penetrate through, whatever its direction – and whose properties are not affected by time, that is, capable of withstanding the effects of the weather, the operations of dressing and undressing etc. Finally, beyond certain pulsed wave power densities electric arcs are liable to form between the metal threads of the weave of the material, and this causes it to deteriorate. At the present time, protective garments can constitute no more than a solution to be adopted in exceptional circumstances.

Although complying with all the safety standards and necessary precautions, personnel exposed to microwave frequencies must undergo medical checks. It is difficult to recommend any examinations which should be made in addition to the usual ones. Any extra work which is unnecessary, expensive and a nuisance for everyone must be avoided, but the results of such supervision will provide valuable clinical data for a better understanding of the risk involved.

Medical supervision must be exercised carefully: without hiding anything from the people subjected to such examinations, care must be taken to avoid arousing in them the occurrence of the symptoms being looked for, as is too easily the case for such subjective symptoms. The questions put to the patient and his general examination should aim particularly at ascertaining the existence of elements of neurovegetative dystonia. Particular attention should be paid to the cardiovascular system by measuring heart rate, blood pressure and, if necessary, by recording an electrocardiogram. Laboratory tests should include a blood cell count and, if possible, electrophoresis of the serum proteins. An ophthalmological examination will check the condition of the lens and the retina. An electroencephalogram, often difficult to obtain as part of a routine examination, would be a useful additional check.

Such examinations, carried out first of all when an individual begins working in an electromagnetic environment, should be repeated regularly once or twice a year. In the event of accidents due to excessive irradiation it would be useful to repeat them once a week for a period of one or two months. If any exceeding of the standard values is not accompanied by clinical disorders, an examination should be carried out as quickly as possible after exposure and repeated one or two weeks later.

Medical checks of this kind may appear superfluous, in view of the small number of pathological symptoms attributable at the present time to microwave radiation. It should be recalled that some of this pathology is probably not detected by our present examination methods, and the above mentioned checks will help to provide a group of medical details which will supplement the results of experiments on animals.

Particular care should be taken with those who wear prostheses. Certain pacemakers²¹ may be disturbed by microwave frequencies. The solution to this problem is one for the engineers and it is likely that within a short time all these devices will actually be immune to radiation. Some do exist at the present time, the 'sentinel' type, which are blocked by the field. They do not react to bradycardia or to cardiac arrest, a fact which has been demonstrated when certain accidents have occurred. In cases of doubt it is preferable for wearers of pacemakers not to be exposed to radiation.

Another risk arises from the presence of metal masses such as dental pivots, bone pins etc. These conducting masses focus the electromagnetic field, possibly resulting in serious lesions.

As a general rule it has been proved by experience that accidents frequently occur because of failure to appreciate the risks involved, either from lack of knowledge or from too much knowledge. It is therefore essential that all technicians required to work with microwave frequencies should be aware of the biological implications.

9. THE FUTURE

The microwave field is a constantly evolving one. Radar itself is becoming increasingly more powerful and more types are being developed. Some transcontinental radars have a peak power of more than ten gigawatts, while, on the other hand, manufacturers are making small units for use in boats, and even in cars. Apart from its use in detection, its industrial applications have widened considerably. Formerly reserved for heating certain materials, such as earthenware, rubber etc., its use is becoming increasingly general. Japan is proposing radar equipment for road repair work; the International Microwave Power Institute has been considering for several years the feasibility of a satellite to capture solar energy for transmission to the Earth in the form of microwaves.

In parallel with the above, developments have also been taking place in biological research. The earlier studies were concerned with the harmful effects alone. Some of the current research in this field is attempting to explain the mechanisms through which microwave radiation affects living matter, while yet other studies are trying to put such radiation to beneficial use either along conventional lines, such as studies on the reheating of tissues which have been kept at very low temperatures¹¹², or on hyperthermia therapy⁷⁹, or along less conventional lines, such as the works of Priore and Pautrizel^{5,94}. Such research is bound to meet with success in the not too distant future. When that time comes, knowledge of the mechanisms involved will show us possible ways in which radiation can be used on cells, something which it is still very difficult to assess.

In the more immediate term, microwave radiation is making it possible in hospital to undertake a check of certain biological parameters¹³⁹ without disturbing the patient. Measurement of the amount of radiation absorbed may provide data¹⁴⁰ which will be valuable in certain diagnoses.

It should be observed in conclusion that microwaves are only one section of the radio wave frequency range. Although the relevant data are even more inadequate, it is certain that waves of a lower frequency⁹⁶ also produce a biological effect. And it will one day be necessary to write a comprehensive report which will show the relationship between electromagnetic waves and electric and magnetic fields.

REFERENCES

1. Peyton, M.F.
Biological Effects of Microwave Radiation. 1 Vol., 333 pp., Plenum Press, 1961.
2. Cleary, S.F.
Biological Effects and Health Implications of Microwave Radiation. 1 Vol., 269 pp., BRH-DBE - 70-2, 1970.
3. —
Biologic Effects and Health Hazards of Microwave Radiation. 1 Vol., 350 pp., Polish Med. Publ., Warsaw, 1974.
4. Tyler, P.E.
Biologic Effects of Nonionizing Radiation. Ann. N.Y. Acad. Sci., Vol.247, pp.1-545, 1975.
5. Pautrizel, R., Rivière, M., Priore, A., Berlureau, F.
C.R. Acad. Sci., Vol.D263, pp.579-582, 1966.
6. Plurien, G., Sentenac-Roumanou, H., Joly, R., Drouet, J.
C.R. Soc. Biol., Vol.160, pp.597-599, 1966.
7. Miro, L., Loubière, R., Pfister, A.
Thermal Problems in Aerospace Medicine. J.D.Hardy Edit., 1 Vol., 254 pp., AGARDograph 111, 1968.

8. Rivière, M., Guérin, M.
C.R. Acad. Sci., Vol.D262, pp.2669-2672, 1966.
9. Miro, L., Atlan, H., Arnaud, Y., Deltour, G., Loubiere, R.
Rev. Med. Aero., No.16, p.21, 1965.
10. Miro, L., Loubière, R., Pfister, A.
Rev. Med. Aero., No.17, pp.9-13, 1966.
11. Rivière, M., Priore, A., Berlureau, F., Fournier, H., Guérin, M.
C.R.Acad. Sci., Vol.D260, pp.2639-2643, 1965.
12. Belova, S.F.
Action Biologique des Très Hautes Fréquences. (Russe), 1 Vol., Moscow, 1960.
13. Imig, C.G., Thomson, J.D., Hines, H.M.
Proc. Soc. Exp. Biol. Med., Vol.69, pp.382-386, 1948.
14. Prausnitz, S., Susskind, C.
I.R.E. Trans. BME, Vol. BME 9, pp.104-108, 1962.
15. Lin, J.C.
IEEE Trans. BME, Vol. BME 22, pp.74-76, 1975.
16. Michaelson, S.M.
Am. Indust. Hyg. Ass. J., Vol.35, pp.766-784, 1974.
17. Presman, A.S., Levitina, N.A.
Radiobiologiya, Vol.2, p.170, 1962.
18. Subbota, A.G.
Tr. VMOLA, Vol.73, p.35, 1957.
19. Gordon, Z.V.
Travaux de l'Institut d'Hygiène du Travail et des Maladies Professionnelles d'U.R.S.S. (Russe), 1 Vol., pp.57-60, Moscow, 1964.
20. Presman, A.S., Levitina, N.A.
Biull. Eksp. Biol. Med., Vol.53, pp.41-44, 1962.
21. Mitchell, J.C., Hurt, W.D., Walters, W.H., Miller, J.K.
Aerosp. Med., Vol.45, pp.185-195, 1974.
22. Nikogosian S.V.
Travaux de l'Institut d'Hygiène du Travail et des Maladies Professionnelles d'U.R.S.S. (Russe), 1 Vol., pp.43-48, Moscow, 1964.
23. Michaelson, S.M., Thomson, R.A.E., Howland, J.
Aerosp. Med., Vol.36, pp.1059-1064, 1965.
24. Tyagin, N.V.
Tr. VMOLA, Vol.73, p.116, 1957.
25. Gorodetskaya, S.F.
Fiziol. Zh., Vol.7, pp.672-675, 1961.
26. Milroy, W.C., O'Grady, T.C., Prince, E.T.
J. Microw. Power, Vol.9, pp.213-218, 1974.
27. Gunn, S.A., Gould, T.C., Anderson, W.A.D.
Biological Effects of Microwave Radiation. (Ref.1), pp.99-115, 1961.
28. Searle, G.W., Dahlen, R.W., Imig, C.J., Wunder, C.C., Thomson, J.D.
Biological Effects of Microwave Radiation. (Ref.1), pp.187-199, 1961.
29. Paff, G.H., Bouceh, R.J., Niemann, R.E., Deichmann, W.B.
Anat. Record., Vol.147, pp.379-385, 1963.

30. Nikogosian, S.V.
Travaux de l'Institut d'Hygiène du Travail et des Maladies Professionnelles d'U.R.S.S. (Russe), 1 Vol., pp.66-67, Moscow, 1964.
31. Zaret, M.M.
N.Y. State J. Med., Vol.74, pp.2032-2048, 1974.
32. Tolgskaya, M.S., Gordon, Z.V.
Pathological Effects of Radio Waves. 1 Vol., 146 pp., Consultant Bureau, 1973.
33. Kitsovskaya, I.A.
Gig. Truda Prof. Zabol, Vol.1, p.75, 1960.
34. Lobanova, E.A.
Gig. Truda Prof. Zabol, Vol.1, p.61, 1960.
35. Marha, K., Musil, J., Tuha, H.
Electromagnetic Fields and the Life Environment. 1 Vol., 138 pp., San Francisco Press, 1971.
36. King, N.W., Justesen, D.R., Clarke, R.L.
Science, Vol.172, pp.398-401, 1971.
37. Joly, R., Servantie, B.
Travail Humain, Vol.33, pp.311-314, 1970.
38. Joly, R.
Arch. Mal. Prof., Vol.29, pp.121-130, 1968.
39. Joly, R., Plurien, G., Drouet, J., Servantie, B.
Rev. Corps Santé Armées, Vol.10, pp.239-260, 1969.
40. Harte, C.
Theor. Appl. Genetics, Vol.43, pp.6-12, 1973.
41. Guy, A.W.
IEEE Trans. MTT, Vol. MTT 19, pp.205-214, 1971.
42. McAfee, R.D.
Biological Effects and Health Implications of Microwave Radiation. (Ref.2), pp.150-153, 1970.
43. Prausnitz, S., Susskind, C., Vogelhut, P.O.
Biological Effects of Microwave Radiation. (Ref.1), pp.135-142, 1961.
44. Addington, C.H., Osborn, C., Swarts, G., Fisher, F.P., Neubauer, R.A.
Biological Effects of Microwave Radiation. (Ref.1), pp.177-186, 1961.
45. Guy, A.W.
IEEE Trans. MTT, Vol. MTT 19, pp.214-223, 1971.
46. Glazer, Z.R., Heimer, G.M.
IEEE Trans. MTT, Vol. MTT 19, pp.232-238, 1971.
47. Deichmann, W.B., Stephens, F.H., Keplinger, M., Lamph, M.F.
J. Occup. Med., Vol.1, pp.369-381, 1959.
48. Friend, A.W., Finch, E.D., Schwan, H.P.
Science, Vol.187, pp.357-359, 1975.
49. Frey, A.H., Messenger, R.
Science, Vol.181, pp.356-358, 1973.
50. Frey, A.H., Seiffert, E.
Life Science, Vol.7, pp.505-512, 1968.
51. Van Ummersen, C.
Biological Effects of Microwave Radiation. (Ref.1), pp.201-219, 1961.

52. Elder, R.L., Eure, J.A., Nicolls, J.W.
J. Microw. Power, Vol.9, pp.51-61, 1974.
53. Howland, J.W., Thomson, R.A.E., Michaelson, S.M.
Biological Effects of Microwave Radiation. (Ref.1), pp.261-284, 1961.
54. Merola, L.O., Kinoshita, J.H.
Biological Effects of Microwave Radiation. (Ref.1), pp.285-291, 1961.
55. Michaelson, S.M.
Biological Effects and Health Implications of Microwave Radiation. (Ref.2), pp.35-58, 1970.
56. Van Ummersen, C., Cogan, F.C.
Biological Effects and Health Implications of Microwave Radiation. (Ref.2), p.122, 1970.
57. Yao, K.T.S., Jiles, M.M.
Biological Effects and Health Implications of Microwave Radiation. (Ref.2), pp.123-133, 1970.
58. Frey, A.H.
J. Appl. Physiol., Vol.23, pp.984-988, 1967.
59. McAfee, R.D.
Am. J. Physiol., Vol.200, pp.192-194, 1961.
60. Korbel, S.F.
Biological Effects and Health Implications of Microwave Radiation. (Ref.2), pp.180-184, 1970.
61. Michaelson, S.M.
Biologic Effects and Health Hazards of Microwave Radiation. (Ref.3), pp.1-14, 1974.
62. Doury, P., Boisselier, P., Bernard, J.G.
Semaine Hôpitaux, Vol.46, pp.2681-2683, 1970.
63. Servantie, B., Bertharion, G., Joly, R., Servantie, A.M., Etienne, J., Dreyfus, P., Escoubet, P.
Biologic Effects and Health Hazards of Microwave Radiation. (Ref.3), pp.36-45, 1974.
64. Czerski, P., Paprocka-Stonka, E., Siekierzynski, M., Stolarska, A.
Biologic Effects and Health Hazards of Microwave Radiation. (Ref.3), pp.67-74, 1974.
65. Miro, L., Loubière, R., Pfister, A.
Biologic Effects and Health Hazards of Microwave Radiation. (Ref.3), pp.89-97, 1974.
66. Rugh, R., Ginns, E.I., Ho, H.S., Leach, W.H.
Biologic Effects and Health Hazards of Microwave Radiation. (Ref.3), pp.98-107, 1974.
67. Lobanova, E.A.
Biologic Effects and Health Hazards of Microwave Radiation. (Ref.3), pp.109-118, 1974.
68. Baranski, S., Edelwejn, Z.
Biologic Effects and Health Hazards of Microwave Radiation. (Ref.3), pp.119-127, 1974.
69. Goldstein, L., Sisko, Z.
Biologic Effects and Health Hazards of Microwave Radiation. (Ref.3), pp.128-133, 1974.
70. Stverak, I., Marha, K., Pafkova, G.
Biologic Effects and Health Hazards of Microwave Radiation. (Ref.3), pp.134-144, 1974.
71. Stodolnik-Baranska, W.
Biologic Effects and Health Hazards of Microwave Radiation. (Ref.3), pp.189-195, 1974.
72. Michaelson, S.M., Houk, W.H., Lebda, N.A., Lu, S., Magin, R.
Biologic Effects of Nonionizing Radiation. (Ref.4), pp.21-45, 1975.
73. Servantie, B., Servantie, A.M., Etienne, J.
Biologic Effects of Nonionizing Radiation. (Ref.4), pp.82-86, 1975.

74. Baranski, S., Edelwejn, Z.
Biologic Effects of Nonionizing Radiation. (Ref.4), pp.109-116, 1975.
75. Czerski, P.
Biologic Effects of Nonionizing Radiation. (Ref.4), pp.232-242, 1975.
76. Elder, J.A., Ali, J.S.
Biologic Effects of Nonionizing Radiation. (Ref.4), pp.251-262, 1975.
77. Szmigielski, S.
Biologic Effects of Nonionizing Radiation. (Ref.4), pp.275-281, 1975.
78. De Seguin, L., Castelain, G.
C.R. Acad. Sci., Vol. D 224, pp.1850-1852, 1947.
79. Dietzel, F., Kern, W., Steckenmesser, R.
Munch. Med. Wschr., Vol.114, pp.228-230, 1972.
80. Czerski, P., Siekierzynski, M., Gidynski, A.
Aerosp. Med., Vol.45, pp.1137-1142, 1974.
81. Bertharion, G., Servantie, B., Joly, R.
C.R. Soc. Biol., Vol.165, pp.1928-1930, 1971.
82. Carpenter, R.L., Livstone, E.M.
IEEE Trans. MTT., Vol. MTT 19, pp.173-178, 1971.
83. Bouchat, J., Marsol, C.
Arch. Ophtalm., Vol.27, pp.593-596, 1967.
84. Bertharion, G., Servantie, B., Joly, R.
J. Microw. Power, Vol.6, pp.62-63, 1971.
85. Berteaud, A.J., Bottreau, A.M., Priore, A., Pautrizel, A.N., Berlureau, F., Pautrizel, R.
C.R. Acad. Sci., Vol. D 272, pp.1003-1006, 1971.
86. Appleton, B.
J.A.M.A., Vol.229, pp.407-408, 1974.
87. Aurell, E., Tengroth, B.
Acta. Ophtalm., Vol.51, pp.764-771, 1973.
88. Baranski, S., Czerski, P.
2nd Internat. Meet. Aerosp. Med., Aviat. Med. Soc. Australia, New Zealand, Melbourne, 1972.
89. Bawin, S.M., Gavalas-Medici, R.J., Adey, W.R.
Brain Research, Vol.58, pp.365-384, 1973.
90. Carpenter, R.L.
Arch. Ophtalm., Vol.84, p.1, 1970.
91. McLees, B.D., Finch, E.D., Albright, M.L.
J. Appl. Physiol., Vol.32, pp.78-85, 1972.
92. Pautrizel, R., Priore, A., Berlureau, F., Pautrizel, A.N.
C.R. Acad. Sci., Vol. D 271, pp.877-880, 1970.
93. Pautrizel, R., Priore, A., Dallochio, M., Crockett, R.
C.R. Acad. Sci., Vol. D 274, pp.488-491, 1972.
94. Pautrizel, R., Priore, A., Mattern, P., Pautrizel, A.N.
C.R. Acad. Sci., Vol. D 280, pp.1915-1918, 1975.
95. Phillips, R.D., Hunt, E.W., King, N.W.
Physiologist, Vol.16, p.423, 1973.

96. Piccardi, G.
The Chemical Basis of Medical Climatology, 1 Vol., 146 pp., Charles C.Thomas Publ., 1962.
97. Goldblith, S.A., Wang, D.I.
Appl. Microbiol., Vol.15, pp.1371-1375, 1967.
98. McRee, D.I., Pendergrass, F.T.
Health Physics, Vol.25, pp.180-182, 1973.
99. Rosenthal, S.W.
IEEE Trans. BME, Vol. BME 19, p.229, 1972.
100. Rozzell, T.C., Johnson, C.C., Durney, C.H., Lords, J.L., Olsen, R.G.
J. Microw. Power, Vol.9, pp.241-249, 1974.
101. Schwan, H.P.
IEEE Trans. BME, Vol. BME 19, pp.304-312, 1972.
102. Schwan, H.P.
IEEE Trans. MTT, Vol. MTT 19, pp.146-152, 1971.
103. Schwan, H.P.
Non Ionizing Radiat., Vol.1, pp.23-31, 1969.
104. Servantie, B., Joly, R., Bertharion, G.
J. Microw. Power, Vol.6, pp.59-61, 1971.
105. Servantie, B., Bertharion, G., Joly, R.
C.R. Soc. Biol., Vol.165, pp.376-378, 1971.
106. Servantie, B., Bertharion, G., Joly, R.
C.R. Soc. Biol., Vol.165, pp.1952-1956, 1971.
107. Servantie, B.
Electron. Fisica Appl., Vol.16, pp.545-548, 1973.
108. Servantie, B., Servantie, A.M., Etienne, J., Beyssat, J., Ballestra-Galli, C., Bertharion, G., Joly, R.
I.R.C.S., 73-8, 7-10-9, 1973.
109. Sigler, A.T., Lilienfeld, A.M., Cohen, B.H., Westlake, J.E.
John Hopkins Hosp. Bull., Vol.117, pp.374-399, 1965.
110. Tanner, A., Romero-Sierra, C.
Ann. N.Y. Acad. Sci., Vol.238, pp.171-175, 1974.
111. Tengroth, B., Aurelle, E.
Phys. Med. Biol., Vol.17, p.690, 1972.
112. Voss, W.A.G., Rajotte, R.V., Dossetor, J.B.
J. Microw. Power, Vol.9, pp.181-194, 1974.
113. Webb, S.J., Booth, A.D.
Nature, Vol.222, pp.1199-1200, 1969.
114. Webb, S.J., Booth, A.D.
Science, Vol.174, pp.72-74, 1971.
115. D'Arsonval, Charrin
C.R. Soc. Biol., Vol.48, pp.96-99, 1896.
116. Vasseur, A.
Revue Maritime, Vol.263, pp.370-383, 1969.
117. Lakhovsky, G.
Radiations et Ondes, Sources de notre Vie, 1 Vol., 80 pp., S.A.C.L., 1937.

118. Van Everdingen, W.A.G.
Acta Radiol., Vol.19, pp.565-581, 1938.
119. Van Everdingen, W.A.G.
Rev. Belge Sciences Med., Vol.17, pp.261-283, 1946.
120. Turner, J.J.
Effects of Radar on the Human Body (Results of Russian Studies on the Subject), AD 278-172, 1962.
121. Dodge, C., Kassel, S.
Soviet Research on the Neural Effects of Microwaves, AD 645-979, 1966.
122. —
Report on Program for Control of Electromagnetic Pollution of the Environment, Office of Telecommunications Policy, 1973.
123. Sher, L.D.
Mechanical Effects of A.C. Fields on Particles dispersed in a Liquid — Biological Implications, 1 Vol, 151 pp., Univ. Microf. Ltd, 1963.
124. Frey, A.H.
IEEE Trans. MTT, Vol. MTT 19, pp.153-164, 1971.
125. Lebowitz, R.M.,
Biologic Effects of Nonionizing Radiation. (Ref.4), pp.182-193, 1975.
126. Frey, A.H.
Biological Effects and Health Implications of Microwave Radiation. (Ref.2), pp.134-139, 1970.
127. Tanner, J.A., Romero-Sierra, C., Davies, S.J.
J. Microw. Power, Vol.4, pp.122-128, 1969.
128. Romero-Sierra, C., Tanner, J.A., Bigu Del Bianco, J.
Biologic Effects and Health Hazards of Microwave Radiation. (Ref.3), pp.145-151, 1974.
129. Bawin, S.M., Kaczmarek, L.K., Adey, W.R.
Biologic Effects of Nonionizing Radiation. (Ref.4), pp.74-81, 1975.
130. Presman, A.S.
Electromagnetic Fields and Life, 1 Vol., 336 pp., Plenum Press, 1970.
131. Berteaud, A.J., Dardalhon, M., Rebeyrotte, N., Averbek, D.
C.R. Acad. Sci., Vol. D 281, pp.843-846, 1975.
132. Polonsky, J.
Ann. Radioelect., Vol.13, pp.1-36, 1958.
133. McLaughlin, J.T.
Calif. Med., Vol.86, pp.336-339, 1957.
134. Rosenthal, D.S., Beering, S.G.
J.A.M.A., Vol.205, pp.245-248, 1968.
135. Miro, L.
Rev. Med. Aero., Vol.1, pp.16-17, 1962.
136. Setter, L.R., Snavely, D.R., Solem, D.L., Van Wye, R.F.
An Annotated Bibliography of Regulations, Standards and Guides for Microwaves, Ultraviolet Radiation and Radiation from Lasers and Television Receivers, 1 Vol., 77 pp., Public Health Service Publ., No.999-RH-35, 1969.
137. Beischer, D.E., Reno, V.R.
Biologic Effects and Health Hazards of Microwave Radiation. (Ref.3), pp.254-259, 1974.
138. Klascius, A.F.
Amer. Industr. Hyg. Ass. J., Vol.32, pp.771-774, 1971.

139. Susskind, C.
Proc. IEEE, pp.673-674, May 1973.
140. Bakin, K., Stickley, E.E.
Phys. Med. Biol., Vol.15, pp.198-199, 1970.

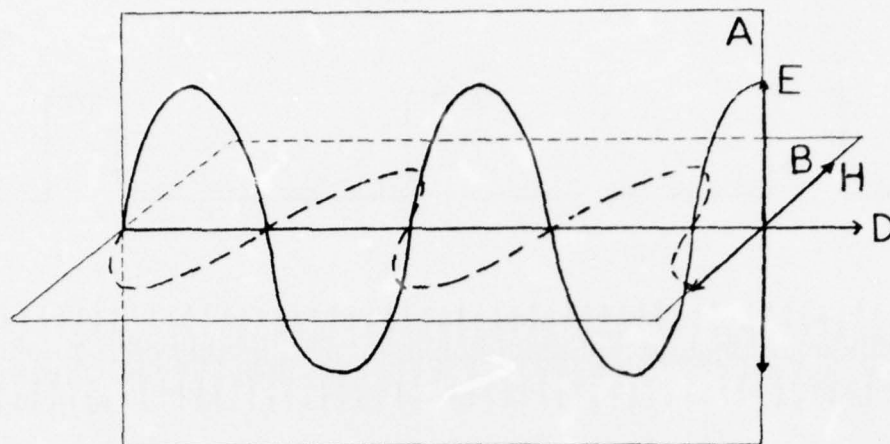


Fig.1 Electromagnetic wave. Formed of an electric field E and a magnetic field H , in phase, which are at right angles to each other and to the direction of propagation D

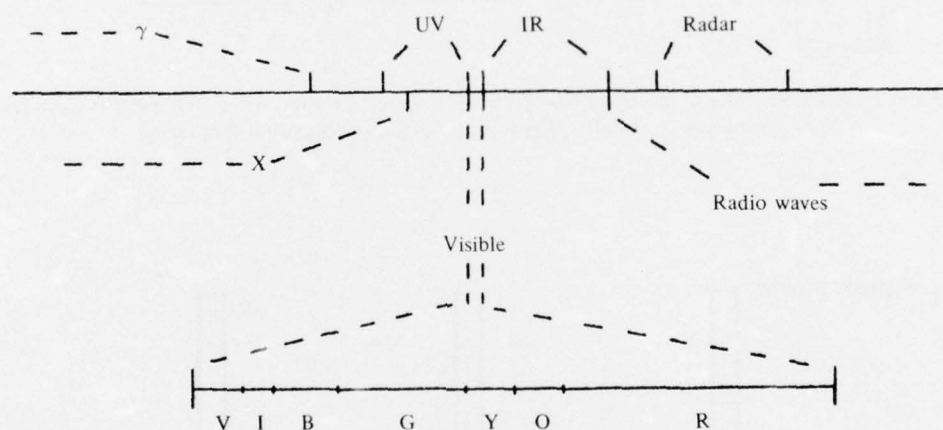


Fig.2 Electromagnetic spectrum

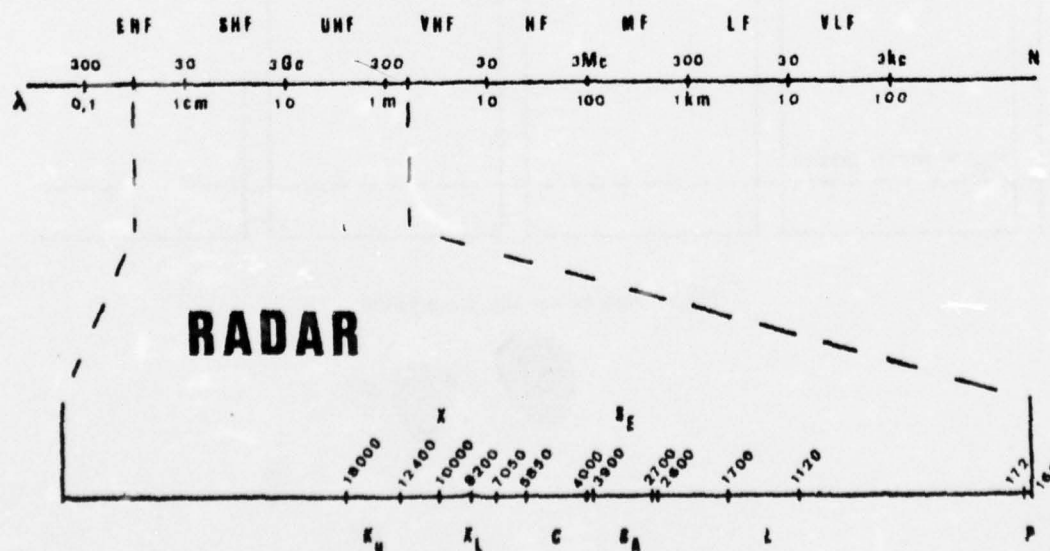


Fig.3 Frequency ranges of radio waves

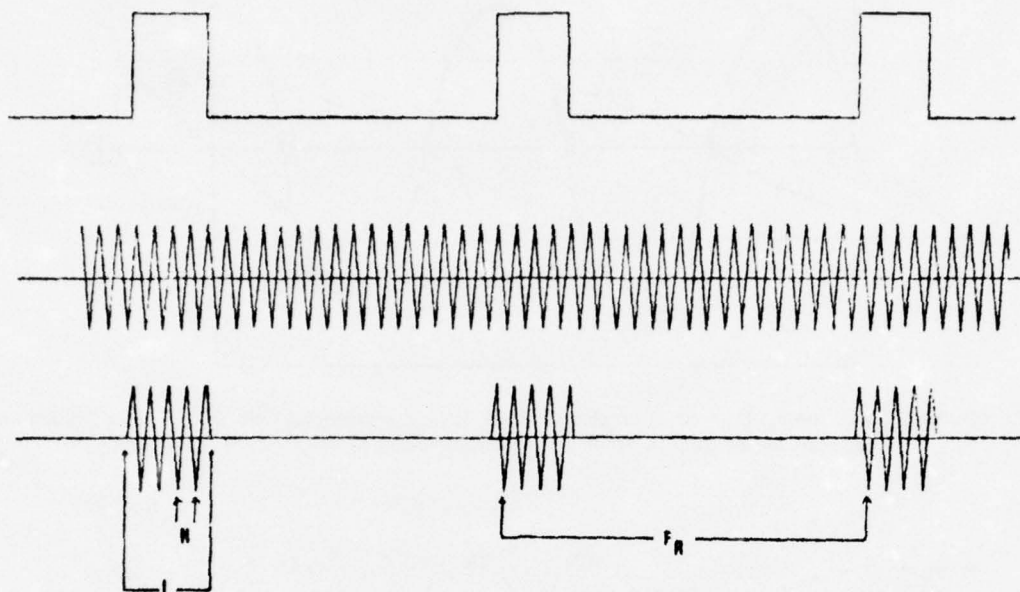


Fig.4 Pulse modulation. The modulation (top trace) is imposed on the carrier frequency (centre trace).
 N = microwave; t = pulse duration; FR = pulse repetition frequency

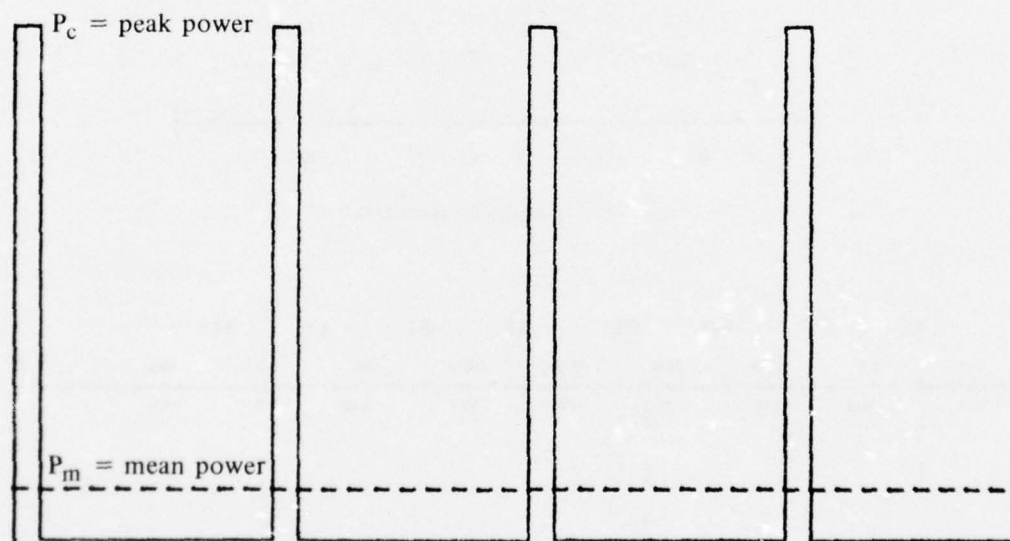


Fig.5 Peak power and mean power

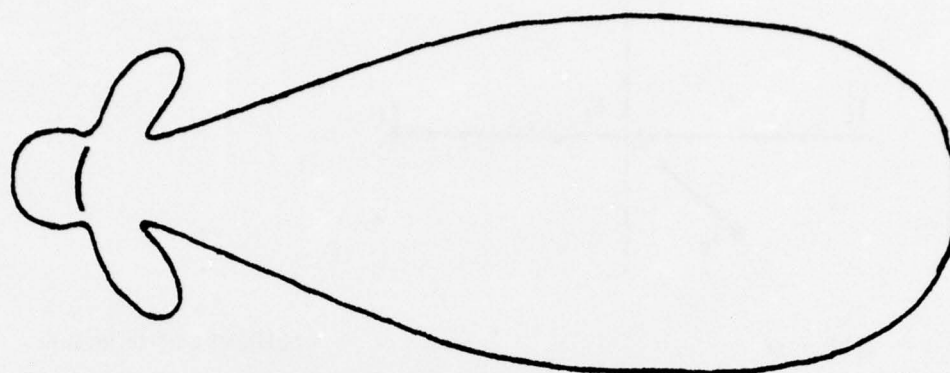


Fig.6 Radiation pattern. In addition to the main beam there are secondary lobes — rear or side

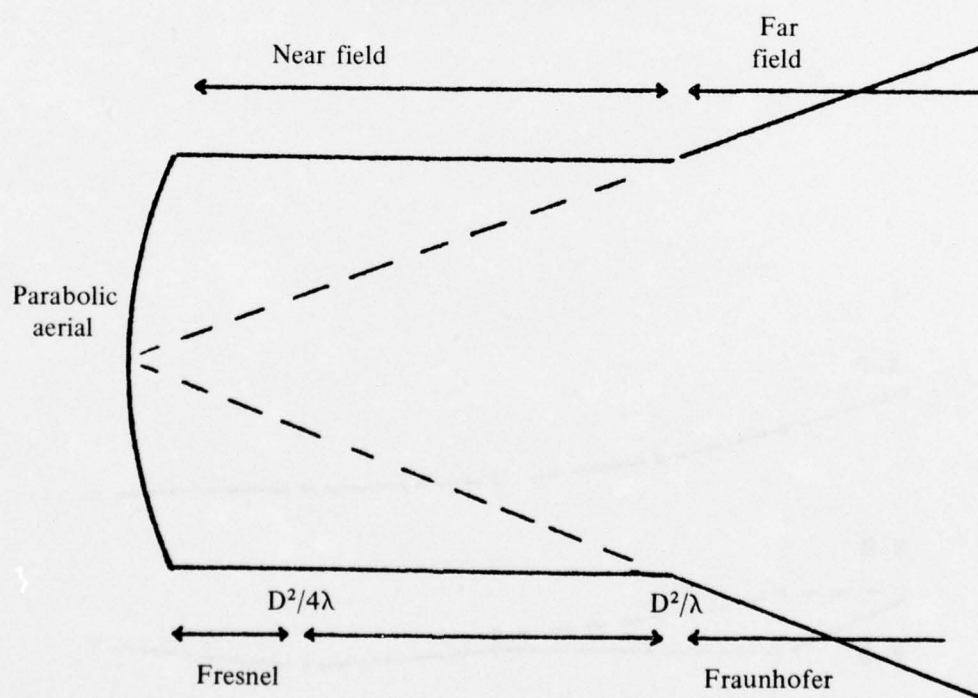
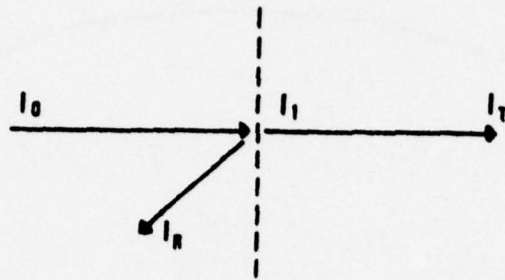


Fig.7 Constitution of the beam. The electromagnetic field is actually formed only in the far field, corresponding to the Fraunhofer zone. The Fresnel zone and the intermediate zone correspond to the near field



$$I_1 = I_0(1 - r)$$

r = coefficient of reflection

$$I_R = I_0 r$$

D = depth of penetration

$$I_T = I_1 e^{-\frac{x}{D}} = I_1 e^{-2\alpha x}$$

α = coefficient of absorption

Fig.8 Reflection from an interface. I_0 = incident radiation; I_r = radiation reflected; I_t = radiation transmitted

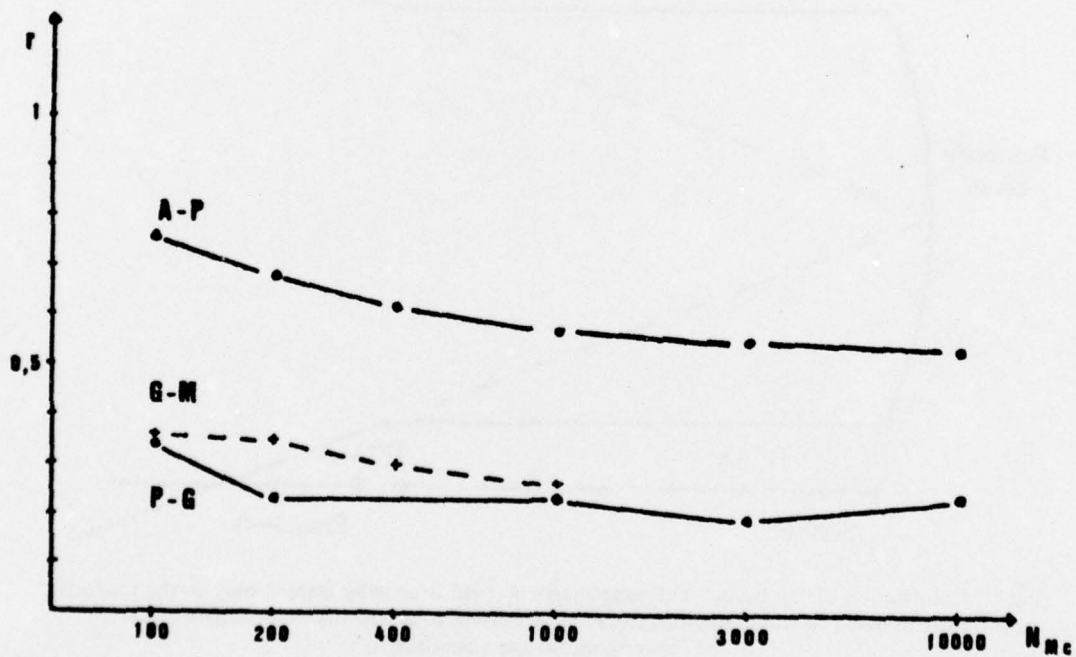


Fig.9 Variation of the coefficient of reflection in dependence on frequency. A-P = air-skin interface; P-G = skin-fat interface; G-M = fat-muscle interface

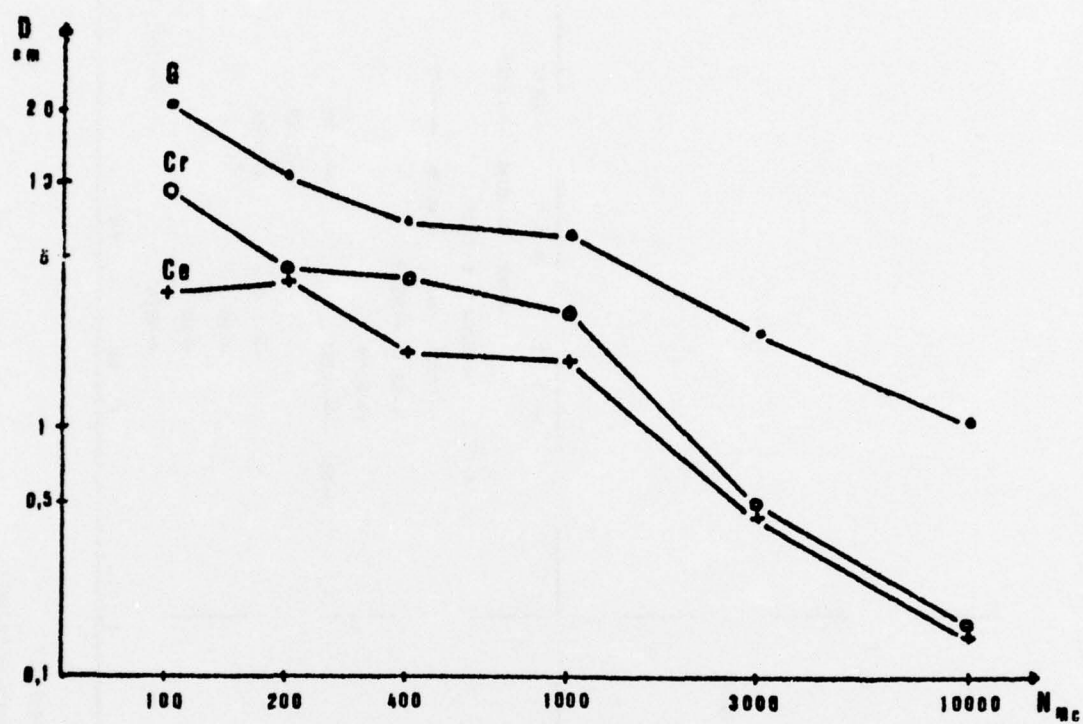
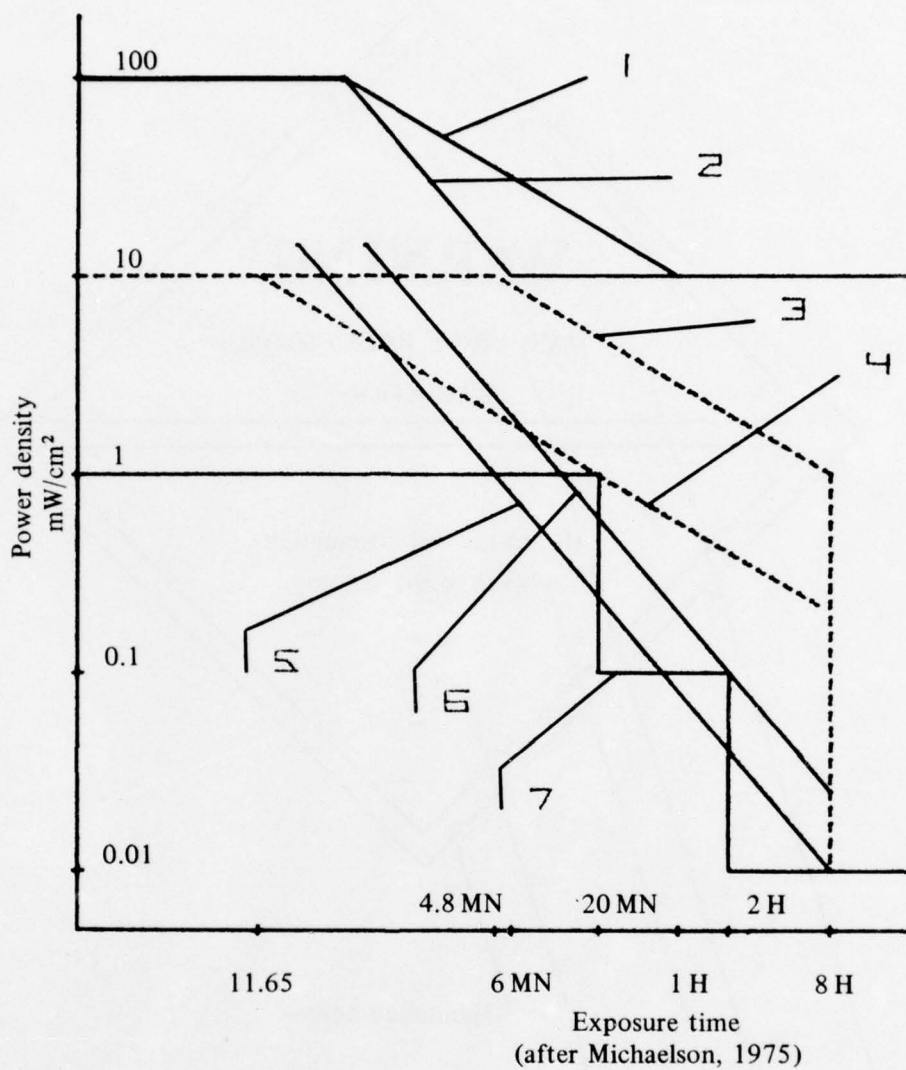


Fig.10 Variation of the depth of penetration in dependence on frequency.
G = fat; Cr = lens of eye; C = brain



Figure 11
(see explanations in text)



- | | |
|-----------------------------|-------------------------------|
| 1. US military standard | 2. ANSI |
| 3. Poland (rotating fields) | 4. Poland (stationary fields) |
| 5. Czechoslovakia (PW) | 6. Czechoslovakia (CW) |
| 7. USSR | |

Fig.12 Comparison of various sets of standards

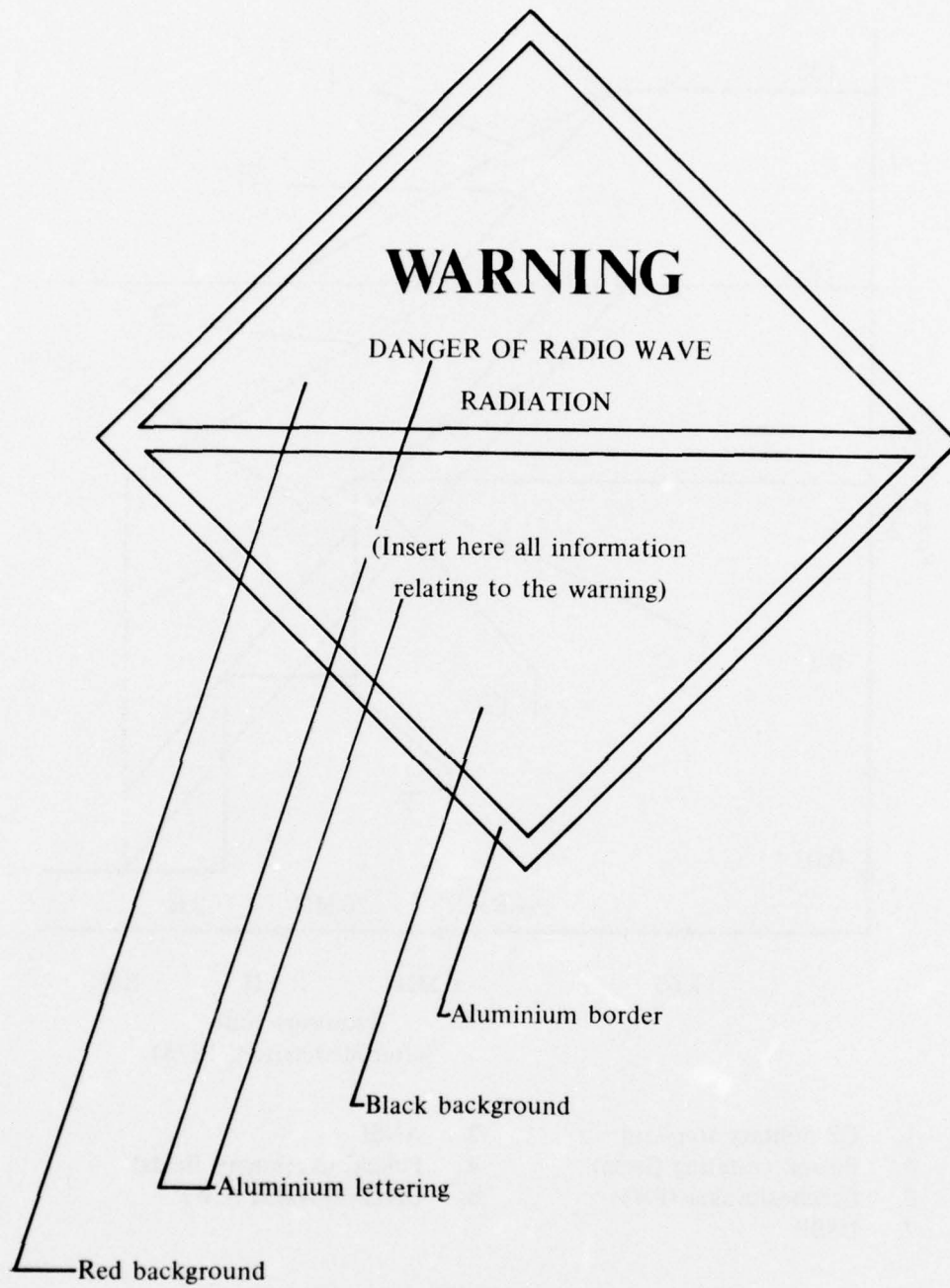


Fig.13 Proposed warning sign

MEDICAL ASPECTS OF LASERS AND LASER SAFETY PROBLEMS

by

W.Schwarzer, MD
53 Bonn (FRG)
Sanitätsamt der Bundeswehr
Platanenweg

1. INTRODUCTION

Lasers, an acronym of "Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation", are optical masers. A laser converts ordinary light of different frequencies and wave lengths into monochromatic coherent light beams. Lasers can be produced over the whole range of the spectrum, i.e., in the infrared, in the visible, and in the ultraviolet. Beams of this type are extremely intense. They are capable of being focused by optical devices; the resulting collimation is so high as to produce beams measuring 1–2 microns in diameter. The following example is a good illustration of what this really means: An erythrocyte, i.e., a red blood corpuscle, has an average diameter of 7.6 microns. A laser beam can be focused to such a high degree that it can perforate an erythrocyte, transforming it into an annular body.

In 1958, when C.H.Townes predicted the development of optical masers from maser techniques, and in 1960, when T.H.Maiman invented the first pulsed laser (ruby laser), no one would have suspected how important this invention would be only 15 years later. Its revolutionizing effect can be compared to that of the electron tube. This has been demonstrated by the mushrooming development of an entire new branch of industry.

Depending on their mode of operation, we distinguish between pulsed lasers and CW (continuous wave) lasers. Only a few years ago the power output of lasers and their efficiency were comparatively low. At the present time laboratories and industry operate solid lasers, gas lasers, and liquid lasers within a power range extending from the milliwatt up to the gigawatt (pulsed laser) and their efficiency has been steadily increasing. For industrial purposes continuous wave CO₂ lasers with outputs ranging from 250 to several 1000 watts and with 15 to 25 per cent efficiency are commercially available. Under certain conditions the efficiency of the CO₂ laser can be increased to 33 per cent. In addition, the power supply devices required for energizing the laser have become smaller and handier as compared with the big and heavy units formerly used.

Today lasers are extensively employed for military applications, e.g., range finding, fire simulators, guidance and control equipment, aiming devices, fire control devices, computers, communication systems, etc. In the Viet-Nam war they were employed by the American side with highly satisfactory results.

At the present time lasers with inconceivably high energy outputs are being developed for technical and military purposes. CO₂ lasers with outputs of several hundred kilowatts are no longer considered surprising achievements.

Due to this development the introduction of high-output lasers as a radiation weapon seems to be possible today. Only a few years ago still a fantastic subject of science fiction, the development of such a weapon has now become technically feasible. However, this will hardly be possible on the basis of the CO₂ laser; but the radiation weapon could be realized with the aid of new developments such as the hydrofluoric-acid laser, and, above all, the iodine laser. The importance of such a weapon would be enormous, especially for defence against low-flying aircraft and missiles, since it would convey energy to the target with the velocity of light, while projectiles of conventional weapons as well as missiles will, even in the future, hardly exceed a velocity of 2000 m·sec⁻¹.

By means of lasers luminous-energy levels can be obtained that are several thousand times higher than the solar energy reaching the earth's surface per cm². The concentrated beam of the laser could effect the evaporation of any known element. It is hoped that it will some day serve as an actuator for nuclear fusion.

It is evident that intense light sources of this type are highly dangerous to biological substances. As a sense organ, the eye is particularly susceptible to the hazards of light radiation. In several cases these light sources have been the cause of eye lesions and blindness. Another important factor is the exposure of the skin, i.e., of the body surface. It must be considered sheer good luck that only second-degree burns have so far occurred in accidents. The extremely high energy of the pulses of some Q-switched lasers and also of the CO₂ lasers could result in severe

injuries to the skin and the internal organs. For this reason it is of prime importance to conduct detailed studies of the pathological effects of laser beams on animals and to determine threshold lesions which may provide the basis for developing rules for the safe handling of laser devices. In this context, eye damage must receive prime attention, since light energies not hazardous to the eye are insignificant to the remainder of the body. In order to understand how lasers cause eye lesions, it is absolutely necessary to study eye lesions caused by hitherto known very intense light sources and to find out common as well as differing factors of the underlying damage mechanisms.

2. FUNDAMENTALS OF THE LASER AND THE LASER PRINCIPLE

Light constitutes only a small section of the wide range of electromagnetic radiation visible to the sense organ called 'eye'. In 1873 it was Maxwell who first demonstrated light to be electromagnetic radiation. In a vacuum its speed of propagation is 3×10^8 m/sec; according to Einstein, the velocity of light is constant in the whole universe. According to the quantum theory, electromagnetic radiation must be regarded as corpuscular radiation; its smallest indivisible quantum is the photon. Its amount of energy is determined by means of the following equation: $E = \nu \cdot h$, where ν is the radiation frequency and h is Planck's constant. Frequency, wave length, and velocity of light are interrelated as follows: $c = \nu \cdot \lambda$, where c is the velocity of light and λ is the wave length.

An emission of electromagnetic radiation, and consequently of light, always takes place when a charged particle, such as an electron, releases energy to an electric field. This is the case when, in a molecule, in an atom, or in an ion, an electron falls from a level of higher energy to one of lower energy. In the case of common light sources this is an incidental process: Not so with lasers. Here these transitions are stimulated by photons and the emissions have the same wave length, the same phase, and the same direction. In order to enable electrons to fall to a lower energy level and to set free radiant energy in the form of photons at the same time, they have to be boosted to a higher energy level first. This can be effected in various ways, e.g., by means of heat as in the case of electric bulbs, by absorption of photons, as in the case of luminous paints, by chemical reactions as in a flame, and by collision with other electrons. As far as lasers are concerned, electrons in a suitable material undergo transition to a metastable state of higher energy. At the same time a population inversion of electrons is effected, i.e., contrary to the natural state, the number of electrons on a higher level exceeds that of electrons on a lower level. If a few electrons pass from a higher metastable level to a level of lower energy, other electrons are stimulated by photons set free in the process and a chain reaction takes place.

A laser has three essential basic component parts which are needed for the generation of laser beams:

- (1) A laser medium;
- (2) A pumping system for raising electrons to higher energy levels;
- (3) A resonant cavity.

All other optical elements such as lenses, mirrors, etc. are only of secondary importance. Their function is to generate shorter pulses or to increase the power output, or they are required for the focusing of beams.

The laser medium must at least have the energy level required for a stimulated metastable state to which electrons can be raised and from which they will not fall back spontaneously to lower levels at once. They should stay on this level for a duration of a few microseconds up to several milliseconds. At a suitable pumping energy a population inversion of electrons should exist on this metastable level, i.e., the number of electrons on the higher level of increased energy should exceed the number of electrons on the lower level of less energy. The electrons are retained there until a stimulated emission sets in. Laser action can already be attained with media having two energy levels; most lasers, however, work with 4 levels or more. Mostly lasers are designated according to their type of laser medium. Media used are: crystals or glass (solid lasers), gas or gaseous mixtures (gas lasers), transistor material (semiconductor lasers), and active material dissolved in liquid or suspension (liquid lasers).

The electrons are raised to a higher level by a pumping system. This can be achieved in several ways. Optical pumps employ a high-intensity light source, e.g., a xenon flash lamp or even another laser; in the case of pumping by means of electron collision, an electric current is sent through the laser material or the latter is bombarded with accelerated electrons. Chemical pumping is effected by energy set free in the course of chemical reactions. In the case of solid lasers and liquid lasers, pumping mostly takes place by optical means, while gas-laser pumping is effected by electron collision. In some types of liquid lasers and gas lasers chemical pumping is employed. As far as semiconductor lasers are concerned, pumping may be of the optical kind or by electron collision.

The resonant cavity has the important function of prolonging the hold-up time of photons in the laser medium. A simple way to achieve this prolongation is to attach mirrors to the ends of the laser medium. By this method photons leaving the laser medium are reflected back into the medium. They pass through the medium many times and thus intensify the photon beam. One of the mirrors attached to the end of the laser medium is partially transmissive and allows parts of the light beam to emerge from the resonant cavity.

Lasers differ with respect to their methods of operation. The difference lies in the way in which energy amounts are supplied per unit time. The difference between pulsed lasers and CW (continuous wave) lasers has

already been mentioned. Generally pulsed lasers operate with pulse durations ranging from a few milliseconds to fractions of microseconds. Q-switched lasers operate with pulses in the nano range (10^{-9} sec), pulsed "mode-locked" lasers with pulse durations in the order of picoseconds (10^{-12} sec).

The following is a short description of the classic pulsed ruby laser and its mode of operation. Here the stimulated emission of light is generated within a ruby crystal having the shape of a slender cylindrical rod, the parallel ends of which are silver-coated for specular reflection. A ruby consists of crystallized aluminium oxide with some of the aluminium atoms replaced by chromates. By the light of a flash lamp these chromates are raised in quanta to a higher level of energy and when they return to their original state photons with a wave length of 694.3 nm are emitted. These photons, which are emitted along the crystal axis, travel from one mirror-coated plane to the other due to internal reflection within the crystal. At the same time they also induce other stimulated chromium atoms to return, prematurely, to the original energy state with a simultaneous emission of light. This causes stimulation of a light wave which moves in one direction after having emerged from the emitting plane of the crystal, i.e., from the partially mirror-coated end face, and which is extremely intense, monochromatic, and coherent.

3. PHOTOTRAUMAS CAUSED BY SUNLIGHT (PHOTORETINITIS SOLARIS, ECLIPSE BURNING)

Ever since antiquity it has been common knowledge that prolonged looking at the sun can produce visual disturbances. According to Plato, Socrates recommended that a solar eclipse should only be observed at its reflected image on a water surface. Galen, too, was already acquainted with eye lesions caused by exposure to sunlight. Galileo Galilei incurred damage to his eyes as a result of astronomical observations of the solar ball conducted by means of a telescope.

Lesions of this kind have extensively been dealt with in medical literature. In most cases a solar eclipse had been watched through a glass not sufficiently blackened. For the duration of an eclipse, twilight conditions prevail over the landscape which may easily tempt a person to underrate the intensity of solar radiation. In addition, in the twilight, the pupil of the eye shows a higher degree of dilatation than in normal daylight conditions. Sometimes the eclipse is observed by means of dark-coloured glasses which transmit practically all of the infrared radiation. As there is no subjective blinding sensation, severe retinal damage may easily ensue. The resulting eye lesions are dependent on the luminous intensity and on the duration of exposure. In light cases blinding occurs with a concurrent after-image of more or less long duration. In the field of vision scotomata may occur which sometimes disappear only after several days or weeks and occasionally are of a permanent nature; at times they are accompanied by a loss of central visual acuity. Ophthalmologically evident fundus lesions such as retinal edema, etc., do not appear in all cases (retinitis solaris).

Severe traumas show objective signs of a photocoagulation necrosis of retinal tissue. They are burns caused by rays of visible as well as of infrared light. They are focused by the optical system of the eye on a small area within the fovea centralis of the retina.

Damage to both eyes occurs very frequently because many people watch the solar eclipse with both eyes. According to Birch-Hirschfeld, the severity of the trauma is, among other things, determined by individual factors; it is also said to vary with the degree of pigmentation. These observations, however, lack general confirmation. On the other hand, a significant part in the occurrence of a lesion is played by the refraction of the eye. An emmetropic or slightly hyperopic person will focus more precisely than a person with a higher-degree uncorrected error of refraction and for that reason a lesion will occur more frequently in persons belonging to the first category. Of course, there no longer exists any such difference, if the error of refraction in the eye has been corrected. Due to the higher transparency of the lens, phototraumas will occur more frequently in younger people than in older persons. Compared to the normal eye, the aphakic eye is much more susceptible to phototraumas.

Normally, looking at the sun will not produce any damage to the eye as the duration of the glance is much too short. When observing a solar eclipse, however, we stare at the solar ball and consciously suppress the winking reflex. Looking at the sun for just one minute can be enough to produce a fundus lesion. At the surface of the earth the intensity of solar radiation amounts to about $0.1 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$. As observed from the earth, the angle of appearance of the solar ball varies: in the month of January it is 32 min, 36 sec, or 9.48 mrad, in July it is 31 min, 31 sec, or 9.17 mrad. This would correspond to retinal image sizes of 161 microns and 156 microns respectively. In the case of marked pupillary contraction to a diameter of about 2 mm, as would be expected for direct observation of the sun, about 3% of this energy would penetrate the eye. Assuming a retinal image size of 160 microns, this spot would be exposed to about $16 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$, if the total energy entering the eye reached the retina. Even if 30% of this energy is lost on the way through the ocular media, this would still leave us with $10 - 11 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$. This amount of energy is still high enough to cause severe retinal burns within a short period of time. According to Verhoeff and Bell, the 26th part of this amount of energy is sufficient to produce retinal burns in rabbits. Outside the atmosphere of the earth the risk of incurring a retinal lesion is considerably increased because the intensity of solar radiation is about 50% higher than that on the surface of the earth (Strughold et al.).

Phototraumas of the eyes will be of frequent occurrence where prolonged looking at the solar ball is a common practice, e.g., during the rites of some religious societies such as the sun worshippers. Occasionally quacks, too, make their victims stare at the sun for the purpose of "strengthening the eyes". The results of this kind of "therapy" can easily be imagined.

During the war airmen frequently suffered eye damage as a consequence of excessive exposure to sunlight. Other cases occurred among AA personnel scanning the sky through binoculars in search of enemy aircraft.

The symptomatology of retinal sunlight lesions comprises subjective as well as objective symptoms.

The subjective symptoms are highly characteristic ones. They can occur without any morphological lesions of the retina and their extent can hardly be related to the size of the latter. With the exception of a certain blinding sensation, the patient will experience few immediate effects. After a short period of time, however, diffuse clouding is experienced in the affected eye. Disturbing after-images occur. Occasionally photophobia and chromatopsia appear. Sometimes photopsia occurs. After about 24 hours this diffuse cloud will contract to form a scotoma in the visual field. This may last for weeks or even months; at times it is permanent. Occasionally it can easily be demonstrated by having the patient look, with the affected eye, at not too fine a wire mesh. Above all, it will be noticed by the patient himself while reading. In a certain spot of the visual field letters will be blurred or totally disappear. Sometimes, especially in the initial stage, the patient notes that there is "movement" in this defect. The borders of the defect may change, it may revolve round its axis, fluttering sensations may occur. Central visual acuity is impaired by the typical location of the scotoma (scotoma heliocliticum). Generally, the reduction of acuity amounts to about 50%, sometimes even to about 90%. As to their size, scotomata may vary considerably. They can be of an absolute or relative nature; at times they are initially absolute and become relative later on. Sometimes an absolute scotoma is surrounded by an annular relative one. In the course of a few weeks or months it becomes smaller and disappears completely. Unfortunately, this does not occur in all cases. However, initially major defects may also disappear. The final state frequently is a permanent central scotoma. Sometimes it is so small that it is very difficult to establish. There is the possibility, however, that a major central defect will remain. According to Strughold, one case has been existing for over 40 years. Normalcy of the peripheral field of vision is retained; however, especially during the first weeks a frequent relative annular scotoma extending over 20–40° may occur. In most cases it will disappear later on (Birch-Hirschfeld).

Eye damage occurring in aviators is frequently not noticed by the affected person. It is discovered in the course of close eye examinations sometimes performed for quite different reasons.

The occurrence of metamorphopsia constitutes a transition to objective symptoms. In the early stage it is ascribed to a retinal edema causing displacement of structural elements in the retina. In the later stages it is mostly caused by degenerative changes.

The objective symptoms initially manifest themselves in the form of an edema in the macular region. In lighter cases the macula appears somewhat darker, which is probably due to a local hyperemia in the choroidal vessels. In the more serious cases the central retinal region is raised; it is edematous and sometimes its colour has changes to gray. Minute specklelike hemorrhages may occur.

Sometimes the central dark spot is surrounded by an edematous ablatio retinae. In most cases oval and occasionally semilunar spots develop in the macula which gradually change to normal retinal tissue. Probably the central spot is due to burns in the pigmented epithelium, while the ring surrounding it is caused by an accumulation of pigment. In serious cases an extensive retinal edema occurs; the clinical picture may resemble a neuritis nervi optici. Outside the macular region small chorioretinal atrophied foci may appear. Detachment of retina, occlusion of central vessels, retinal hemorrhages, retrobulbar neuritis, and atrophy of the optic nerve are conditions of infrequent occurrence.

It is not easy to make a prognosis with regard to eye damage caused by sunlight. In most cases the faculty of vision will improve in the first two months. If scotomata remain, they mostly become relative and sometimes too small in size for an eccentric fixation to be possible. In the macula, the red zone with its yellow spots mostly changes its colour to gray and may disappear altogether. Generally, a favourable prognosis can be made, if the symptoms, above all the scotoma, subside in the first month. Improvement is possible even after several months; in most cases, however, the damage is irreparable. If a macular lesion, especially a hole in the macula, has developed, a permanent central defect of vision will probably always remain. Frequently the size of a scotoma may, even after a period of years, decrease to such an extent that it can hardly be established any longer. Unfortunately, this only happens in some few and far between cases.

4. RETINAL PHOTOLESIONS DUE TO TECHNICAL LIGHT SOURCES AND LIGHTNING FLASH

Intense technical light sources sometimes cause subjective visual disturbances, while objective signs rarely occur. Prolonged looking at the flame of arc lamps and electric as well as autogenous welding arcs can lead to decreased

acuteness of vision and to the development of a scotoma if the eyes are unprotected. Occasionally, a narrowing of the peripheral field of vision may also occur. Erythropsia and xanthopsia are rare symptoms. There is a difference between this clinical picture and that of keratitis photo-electrica very frequently caused by electric welding, since this constitutes a corneal condition caused by the light of the welding arc which is rich in ultraviolet rays. Ultraviolet rays do not penetrate into the inner eye by the way of the cornea.

According to Rutgers (as quoted from Duke-Elder), the light intensity in autogeneous welding at a distance of 40 cm from the eye amounts to $156,000 \text{ ergs} \cdot \text{sec} \cdot \text{cm}^{-2}$, 95% of which is infrared light. There may be an occurrence of temporary scotomata, and without any evident signs on the fundus oculi the faculty of vision may be reduced to the perception of hand movements. Objective symptoms manifesting themselves at the fundus occur very infrequently. At times retinal edemas and macular changes were found which led to the development of holes.

Prolonged staring at the glow of an electric furnace or into the fire-box of a locomotive sometimes caused periphlebitic changes in the retina, hemorrhages in the vitreous body, and chorioretinal lesions. Similar lesions were occasionally found in glass blowers. They can also occur after short-circuits in power transmission lines and can be observed following lightning flashes. Ten Doesschate also mentions the occurrence of annular scotomata after blinding caused by ultraviolet lamps.

It is questionable whether fundus lesions, especially macular changes, caused by light sources of this kind are invariably of a thermal nature. Naidoff and Sliney observed a case of macular lesion caused by staring at an electric welding arc with unprotected eyes. By measurements performed on electric arcs and by analyzing the energy conditions they arrived at the conclusion that thermal lesion had been caused in this case, since the amount of energy required for causing a lesion of this type had not been reached. In this case the reaction mechanism might have been of a different nature or the lesion could have been caused by photochemical processes. It has been thought that such processes might provide an explanation for most retinal lesions caused by light sources of this kind.

5. RETINAL PHOTOLESIONS RESULTING FROM NUCLEAR BURSTS

Due to the development of nuclear weapons the problem of retinal photolesions has gained unexpected importance. The detonation of an atomic warhead starts with an intense flash of light. In the case of a 20-kT nuclear fission bomb, the so-called nominal bomb, the spherical fireball reaches a diameter of 13.7 metres within 0.1 millisecond after the detonation. Its surface temperature is 300,000 K. At a distance of about 6 miles its luminous intensity is 100 times that of the sun. The radiation of the initial flash is rich in ultraviolet and blue rays. After 10 milliseconds the radiation turns reddish. Simultaneously with the surface temperature the quantity of light emitted per unit area and the type of radiation change considerably.

It is evident that such enormously high light intensities will affect the retina. When the observer looks in the direction of the fireball the image of the ball is formed on his retina. This initial image consequently receives per unit area the total of this radiant energy. As the fireball expands, annular zones form around this initial image which contain less energy per unit area. In addition, the radiation is more reddish as compared with the initial flash. The diameter of the fireball image on the retina varies linearly with the size and distance of the latter. The opening width of the pupils is also of considerable importance.

The occurrence of a retinal lesion does not depend on the distance of the detonation only. It is considerably influenced by atmospheric transmission. Rain, smoke, dust, and fog can provide significant protection.

The yield of a nuclear weapon as such is of little importance to the development of a retinal burn. Atmospheric transmission being the same, a 2 Megaton weapon will indeed yield 100 times the energy of a 20 kT weapon and its total radiation at a distance of 30 miles will equal that of the latter at a distance of 3 miles. Smaller weapons release their energy more rapidly and the diameter of their fireball image on the retina is smaller. The released radiation reaches the eye in such a short time that its protective mechanism — blinking reflex and pupillary contraction — cannot become effective in time. In weapons in the megaton range the thermal pulse wave lasts long enough to provide the eye with some degree of protection by activation of the blinking reflex.

6. RETINAL PHOTOTRAUMAS

Excessively intense light may cause retinal damage by thermal action. Rays of this type belong to the visible and infrared regions of the spectrum. They are mainly absorbed by the pigmented epithelium of the retina and converted to heat. The temperature and the exposure period determine the extent of the resultant heat damage. A certain amount of heat can be dissipated by the vascular system of the eye, especially by the choroid vessels. Thus, less intense light sources need a longer period of time to cause damage to the retina. However, when the retina is struck by a highly intense light wave, e.g., by the flash of a nuclear explosion or by a laser beam, the heat is released within such a short period that it cannot be dissipated via the blood stream.

There is a marked difference between the occurrence of a skin lesion due to light and that of a retinal photolesion. In the first instance the intensity of the incident energy is inversely proportional to the square of the distance from the light source. This is not the case in retinal damage because of the effect of the optical system of the eye. In this case the image of the light source is formed on the retina with a very high energy density accumulating in a minute region of the retina. Retinal damage caused by excessively intense light may be of the following two types:

- (1) Morphological lesions which can be detected on the fundus oculi by means of optical devices;
- (2) Functional damage which, if significant enough, can be identified by establishing the defects in the field of vision parametrically; these cannot, however, be detected on the fundus oculi of the living eye by optical devices.

We assume, however, that there is a continuous transition between these two types of damage. Besides, microscopic lesions can be detected by histological examination of the phototraumatic regions of the eye. Not every traumatized eye can, however, be histologically examined. For the purpose of clinical evaluations of retinal photo-traumas, classification into morphological and functional lesions is, therefore, justified.

7. PHOTOTRAUMAS OF THE EYE RESULTING FROM LASER BEAMS

As regards the development of a phototrauma, there are marked differences between laser-generated light and hitherto known excessive light sources. The latter essentially have two action factors:

- (1) The thermal action factor and
- (2) the photochemical factor.

The latter is of importance especially in threshold lesions. In the field of lasers even more factors can be of importance in the development of a lesion:

- (1) thermal action,
- (2) acoustomechanical shock waves,
- (3) the photochemical factor,
- (4) generation of harmonic oscillations, e.g., doubling of frequency, frequency tripling, etc., and resonance interference,
- (5) occurrence of free radicals,
- (6) Brillouin scattering,
- (7) Raman scattering, and
- (8) reflection.

The factors of considerable importance in the development of laser lesions almost always comprise thermal action, acoustomechanical shock waves and, possibly, doubling of frequency and resonance interference. The effects of the other factors are masked by the aforementioned factors. Their effects manifest themselves only in lesions approaching the threshold value. This also applies to the partial effects of the doubling of frequency. In order to study them, tests must be arranged in such a way that the thermal factor will become effective to a small degree only. This can be accomplished by a reduction of pulse duration, e.g., by mode-lock, etc. Harmonic oscillations occur at high electric and magnetic field strengths and very short pulse durations. The influence of harmonic oscillations and of factors (5) to (8) on biological material is the subject of intensive research at present.

In general, there is practically no difference between retinal lesions caused by laser beams and those resulting from the effects of other excessively intense light sources. The lesions may be insignificant in the beginning, a reversible retinal edema for instance, and then steadily increase in severity, developing necroses of the retina and the choroid. The most severe lesions may manifest themselves by explosion-like ruptures of the retina and the choroid accompanied by a significant hemorrhage into the vitreous humor and even by perforation of the sclera. Any effect on the function of the eye depends on which portions of the retina are damaged. Less severe lesions will probably not be detected by the patient, if they are sufficiently small. On the other hand laser beams are capable of causing blindness when they fall upon the macula, the point of central vision, or on the optic nerve. Injuries to the papillomacular fibres can also cause serious visual malfunctions. It is obvious, however, that the extent of damage also depends upon the size of the lesion. But even tiny lesions such as those frequently caused by lasers with a high pulse repetition frequency would have cumulative effects and would finally result in substantial permanent damage.

In addition to the damage caused by direct exposure of the eye to intense light, a laser beam presents a hazard even after having been reflected from a surface, in particular, if the surface is specular. Exposure to reflected laser beams could even be the most common cause of injuries, since many persons, who will normally avoid direct exposure, will not necessarily be aware of this type of hazard.

In the visible spectrum, the light is emitted as a highly collimated virtually parallel beam which is refracted by the eye to form a focused image on the retina. These images range in size from 200 microns down to 10–20 microns (diffraction limit of the eye). In small images high energy densities accumulate which can even exceed values in the order of gigawatts, i.e., 10^9 W/cm^2 . The energies accumulated may vary to a large degree depending on the principle

of operation of the laser device, e.g., pulsed "mode-locked" lasers with pulse durations in the order of picoseconds (10^{-12} sec), Q-switched lasers with pulse durations in the order of nanoseconds (10^{-9} sec), or continuous wave lasers.

An additional factor influencing the accumulation of energy is the type of material employed for the laser. In addition to the physical characteristics of the laser devices, the spectral properties of the eye are of importance. For instance, the eye media transmit 90–95% of the light emitted by a ruby laser at a wave length of 694.3 nm, while only about 45% of the light from a neodymium laser is transmitted. The fundus oculi reflects 15–20% of the ruby laser light and about 40% of the light from a neodymium laser. Due to the higher absorption, however, the eye media are much more susceptible to damage by a neodymium laser beam.

The size of the pupil is another important factor in the development of a retinal lesion. In bright daylight the pupil diameter is about 3 mm, in the dark it is 6–7 mm. Therefore, it is evident that the smaller the pupil diameter, the smaller the quantity of laser light that can reach the retina. Unfortunately, the size of the pupil does not always provide some degree of protection, since there are laser beams with diameters of less than 2 mm.

The pigmentation of the eye is another important factor in the occurrence of retinal lesions. It does not only vary from person to person, but also from region to region in the same eye. Heavily pigmented human races are, therefore, especially susceptible to damage by light beams.

The type and the extent of a lesion strongly depend on the exposure time. If the light intensities are the same, the effects of short-term exposures are milder than those of long-term exposures. Examinations of minor retinal threshold lesions produced by pulses of relatively short duration (0.2–2.0 msec) revealed histological damage in the pigmented epithelium only. At exposures exceeding 10 msec, damage of the choroid occurred as well. Since the light absorptivity of the pigmented epithelium is nearly the same as that of the choroid, the difference in effect must be ascribed to the different thickness of tissue. Being ten times as thick as the pigmented epithelium, the choroid will be affected by a tenfold amount of light energy per unit volume only. For this reason, provided that lasers of about identical light intensities are applied, in slight cases Q-switched lasers with exposure periods below 1 msec and most of the pulsed lasers with pulse duration from 1–2 msec will only affect the pigmented epithelium while continuous wave lasers can produce damage to the choroid.

Though thermal action is the most important factor in the development of retinal photolesions, there are other factors involved, too. Especially in the case of Q-switched lasers of very high energy densities (megawatts/cm²) and of short pulse duration (5–50 msec), the incidence of damage cannot be ascribed to the liberated heat alone. It must be assumed that other physical factors play an important part such as ionization or shock waves which might be responsible for the rupture of vessels and the ejection of tissue material into the vitreous humor. An extremely high radiation intensity at a monochromatic wave length is an abnormal stimulus in itself. This might be the reason why biological systems are sometimes shattered by resonance interference. Any molecular bond which exhibits resonance at this specific frequency may be affected. However, if genetic material or enzyme systems are affected by this type of interference, a number of pathological reactions will occur. This might especially be the case with radiation doses causing submorphologic, i.e., functional, lesions. Damage to the enzyme system of the retina caused by laser beams has been established. Another frequency-dependent effect is caused by the so-called "doubling of frequencies". The pigment matter in the pigment cells of the retina has a crystalloid structure and could liberate ultraviolet light at a wave length of 347.2 nm after having been struck by a laser beam. However, the area where it would be liberated, i.e., between the retina and the choroid, is normally never exposed to ultraviolet radiation. At present, no one knows what reactions can be induced in the retina by ultraviolet light of this type.

The eye is not only susceptible to damage by light of the visible and near-infrared regions but also by ultraviolet and far-infrared radiation. As mentioned above, a neodymium laser can cause damage to the optical media, not only to the cornea and lens, but also to the vitreous humor. With a Q-switched ruby laser, this kind of damage to the eyes of rabbits was not detected even when maximum power was used. The absence of damage to these structures may be explained by their low energy absorptivity at the wave length of the ruby laser. Furthermore, the mechanical effect of the laser beam does not appear to be sufficiently strong to produce structural changes when striking these tissues. The iris differs from the cornea and lens by its relatively high energy absorption at the ruby wave length. Despite its high energy level, the Q-switched laser will only cause minor damage to the iris.

The CO₂-laser with a wave length of 10.6 microns is a special hazard to the front section of the eye. As mentioned above, this is not only due to its extremely high power output, but also because about 67% of the beams of this wave length is absorbed within the first 10 mm of the cornea. This means that the normally transmittant optical media are intransmittant to this wave length. The same is true of the skin; the consequences of its burns, however, are less crucial. Clinical and histological examinations have shown that the eyes of rabbits are not affected when exposed to radiation of an energy density of 0.1 W/cm² for 30 minutes. However, exposure of animals to an energy density of 1.5 W/cm² for 1 second produced damage to the animal cornea, even though the lesion was reversible and no longer detectable a few days later. Higher energy densities produce severe and deep ulcerations which eventually result in the loss of the eye.

8. EFFECTS OF LASERS ON CELLS AND CELLULAR STRUCTURES

Studies concerning the influence of light, including excessively intense light sources, on cells and cell constituents have been under way for a long time. At first, wide-band light studies were conducted which later were followed by tests with certain wave lengths. The laser is especially suited for investigations of this type since coherence and monochromasia of the beam allow sharp contrasting of effects in the different spectral regions and because the high intensity of the beam permits selective damage to or destruction of the absorbing material. There are laser microscopes which, as has already been mentioned, are capable of focusing the beam down to a diameter of two microns or even one micron. Such fine pencils of light are of importance with regard to the study of cellular organella. A further advantage of the laser is the fact that it also permits irradiation of highly mobile cells at short pulse durations. Laser radiation can delay cell division, impede cell growth, and impair cell differentiation. The presence of specific pigments within the cell facilitates the absorption of the laser beam. Some degree of insight into the cellular function was gained by destroying organella or parts thereof. Thus important details concerning the assimilation of nucleic acids were learned from autoradiographs of mitochondria which had been irradiated with laser light. The effects of laser beams on macromolecules, e.g., tryptophans, proteins, gamma globulin, enzymes, nucleic acids, etc., have also been studied intensively. The results differ greatly and a great deal of research work still remains to be done in this field. It is interesting to see that in-vitro macromolecular systems do not recover as easily from laser irradiation as in-vivo systems do. The inactivation and destruction of macromolecule, organelle, and cell is presumably caused chiefly by the heat developed and by shock waves. Formation of free radicals may also occur, but their effect on cellular structure and cellular activity is presumed to be insignificant. The absorption of laser light in the cell constitutes a molecular process the course of which varies in the individual organella. The chromatin of the nuclei may lump and within it vacuoles may occur. Depending on the wave length, absorption in the mitochondria may exceed that taking place in the nucleus itself. Differences in water concentration or thermal resistance of the nucleic acids might account for the fact that occasionally the nucleus is less susceptible to laser light than the cytoplasm.

9. THERAPEUTIC APPLICATIONS OF THE LASER

The idea of treating retinal affections by application of excessively intense visible light has been cherished for a long time. It is based on the observation that a retinitis solaris will leave a chorioretinal scar on the fundus oculi in which the retina and the choroid are firmly soldered to each other. But it was not until about 1950 that this project could be realized. Meyer-Schwickerath of Bonn University and Littmann of the Zeiss Company developed the well-known photocoagulator in which a xenon high-pressure lamp served as a very intense white light source. After the laser had been invented some 10 years later, it, too, was employed for the same therapeutic purposes. It is an excessively intense light source of partly superior, in many cases, however, still inferior characteristics when compared with the xenon arc lamp. This therapy consists of the conversion of luminous energy into heat by pigmented tissues with subsequent coagulative effect. Here melanin and hemoglobin are the substrates which absorb the light in the tissue. The cornea, aqueous humor, and lens as well as the vitreous body are not changed by visible light, while the iris and the pigmented epithelium of the retina and choroid with their differing degrees of pigmentation can be coagulated.

Of the many types of lasers only five are of ophthalmological interest. These include the ruby laser and the neodymium laser, pulsed lasers emitting their light in pulses with durations of some microseconds to milliseconds and the helium-neon laser and the argon laser which are continuous wave lasers. The YAG-Nd laser, too, is of ophthalmological interest. It can be employed as a CW laser as well as a pulsed laser. At present mainly ruby lasers with pulses of 200 microseconds to a few milliseconds are used for clinical applications. Q-switched lasers with ruby serving for laser material cannot be employed for therapeutic applications because they constitute a major source of danger to the fundus oculi. As far as operations on the eye are concerned, ruby lasers are of advantage insofar as their dark red monochromatic light does not produce photophobia. Due to the short time of exposure, anaesthesia is not required. It is an additional advantage that treatment near the macula involves only a low risk. However, ruby lasers are attended with considerable disadvantages as well. Their red light (694.3 nm) is poorly suited to vascular coagulations at the fundus as it is not readily absorbed by red blood vessels, angiomas, or aneurysms. The blood pigment is of almost the same spectral colour as the ruby light which is largely reflected when striking vascular tumours. In addition, the time of exposure frequently is too short in the case of pulsed lasers. During the short pulse the total energy is delivered to the tissue and, since no adjustments are possible during the exposure, serious complications such as hemorrhages into the vitreous humor or retinal hemorrhages may arise, if the energy of the shot is too high. The fundus lesions are sharply circumscribed, which is a disadvantage if a larger reactive zone is desired.

The neodymium laser (1060 nm) is attended with the disadvantage that the eye media absorb its light to a very high degree. This may lead to the development of a cataract. Opacification of the vitreous body may also occur. Electrophoretic protein changes within the vitreous body were established as a result of animal experiments. Still another disadvantage of the neodymium laser is the fact that it requires 5 to 10 times the energy of the ruby laser to effect the same type of fundus lesion. Its advantage, however, is that its beam is invisible to the eye and, therefore, does not cause blinding with photophobia when applied in eye operations.

The helium-neon laser (632.8 nm) is a CW gas laser emitting a bright red light. As compared with the ruby laser, it is attended with the advantage that its times of exposure are variable. Prolonged times of exposure, however, require retrobulbar anaesthesia. It is disadvantageous insofar as its light is more blinding when compared with ruby light.

The argon laser emits numerous wave lengths ranging from the blue-green to the ultraviolet spectral band. Its principal wave lengths are 488 and 515 nm. This CW laser is attended with great advantages when compared with the ruby laser. Since the transmission of the principal wave lengths through the eye media amounts to almost 95%, it is superior to the He-Ne laser as well. Furthermore, the energy output of the argon laser is higher than that of the He-Ne laser. It offers the great advantage that the principal wave lengths are to a very high degree absorbed by hemoglobin and retinal pigmented epithelium. The YAG-Nd laser is very promising, too. Its laser medium is an yttrium aluminium garnet crystal with neodymium doping which emits a wave length of 1064 nm. This wave length approaches that of the neodymium laser; since the YAG-Nd laser has sufficient energy, its second harmonic wave may be used; a wave length of 532 nm is obtained by frequency doubling. This wave length is not quite as advantageous as the principal wave lengths of the argon laser; this minor disadvantage is, however, more than compensated by the fact that this laser can be employed as a pulsed as well as a Q-switched laser and even as a CW laser.

In the treatment of retinal affections the effects of photocoagulation are (1) cicatrization and (2) vascular obliteration.

As there is a potential retinal cleft between pigmented epithelium and sensory epithelium, cicatrization is of special importance in the operative treatment of detachments of the retina. Blocking of retinal holes, especially at the posterior pole of the eye, and operative treatment of retinoschisis, has also been successfully performed by application of photocoagulation. Permanent occlusion of blood vessels is effected by the formation of a coagulum and by subsequent organization of the coagulation clot. This is of importance in the treatment of newly-formed blood vessels at the fundus — rete mirabile — occurring in retinopathia diabetica and periphlebitis retinae ((Eales' disease). The application of laser beams is also the best way to perform photoobliteration of microaneurysms which, above all, are a guiding symptom of diabetic retinopathy. Vascular tumours such as hemangiomas and angiomas of the retinae have also been successfully treated by application of photocoagulation.

The laser has furthermore been used as an operating instrument in affections of anterior ophthalmic regions, e.g., for perforative opening of the iris, in optical or therapeutic iridectomies, but also in the treatment of tumefaction of the iris. It has also been applied in the treatment of glaucoma with narrow angle iriditis, where an attempt was made to burn an opening into the angle of the iris in order to create a drainage hole for the aqueous humor. In addition, photocoagulation treatment of glaucoma with open wide angle iriditis has been attempted recently. It would be premature to offer an opinion at this time; it should, however, be noted that goniotomy and trabeculotomy have been attempted before with other cauterizing instruments and that the expected success very often failed to materialize.

Laser treatment of macular affections has been successful very frequently. This type of affection is of the greatest importance with regard to the visual process. Affections of this kind are of a partly inflammatory and partly degenerative nature. Now and then, trauma and metabolic diseases, too, are the cause. Treatment of these affections must be of the quick-acting kind. If the therapeutic effect sets in too slowly, retinal tissue is replaced by a neuroglial scar, which implies reduced central vision. Here angiography with fluorescein is of great value. This technique allows visualization of minute oozing points even in presence of severe macular edema. They can be exactly established by application of fundus photography and by slit-lamp examinations with the ruby lens or with a contact lens. Cases of highly successful treatment of retinopathia centralis serosa have been reported which, in spite of its marked tendency to spontaneous recovery, had a high rate of defective healing. Cases of chorioretinitis centralis have also been successfully treated by application of laser photocoagulation. Frequently histoplasmosis has been the causative factor in this type of affection. Medicinal treatment of this affection is difficult. Neither steroids nor antibiotics have been of any therapeutic value. Desensitizations have also failed. If the inflammatory lesion is a small one, laser photocoagulation is a useful technique; in the case of extensive lesions it is mostly ineffective. Macular edema following cataract operations and microcystic macular edema occurring after retinal phlebotomy and in retinopathia diabetica respond favourably to photocoagulation. In the case of senile discoid degeneration of the macula it proved ineffective.

Laser-beam treatment of ophthalmic tumours has produced dubious results only. Investigations into the effect on pigmented and nonpigmented tumorous tissue have shown that the tumorous masses are not completely destroyed. In most cases irradiation does not even cover all tumorous regions. Development of a hyperaemic region occurs around the irradiated focus (histaminic effect) and the danger exists that viable tumorous cells will be spread via the blood stream. Despite maximum exposure tumorous cells in cell cultures exhibited undisturbed growth after having been irradiated with laser beams. Morphologically, too, the cells remained unchanged. Another difficulty in laser-beam operations is the correct dosing of the energy quantum required. If the energy dose is too high, a water-vapour explosion may cause rhexis of the tumorous tissue. Living tumorous cells are then hurled into the surrounding area, a process which may lead to the development of metastases in, above all, the inner eye.

In major surgery it has been tried to employ the CO₂ and argon lasers for cutting soft parts. Since bleeding is very insignificant, this method would be of special advantage with regard to plethoric organs, though eschar

formation occurs at the surface of incision. Unfortunately, these operative lasers are as yet very difficult to handle. They constitute a major fire hazard. Furthermore, the operator and the assisting surgeons sustain burns very frequently. Reflection of beams by surgical instruments constitutes an additional hazard. The field of operation is obscured and the operator annoyed by the generation of smoke and vapour. Even if some of these negative factors could be eliminated, the operative laser would not constitute any significant progress in the surgical field when compared with the operative methods hitherto used.

In dermatology, too, the laser has been employed for therapeutic purposes. Very good results have been obtained in the removal of tattoo-marks. Laser treatment of cutaneous tumours has, however, been disappointing. Here the same can be said as with respect to laser therapy of ophthalmic tumours.

In dentistry experiments have been conducted aimed at "blasting off" carious foci by application of a laser. Being completely painless this technique is an interesting one. Unfortunately it still involves considerable difficulties, even when a glass fibre optic system is employed. More promising, however, is an experiment conducted with the aim of producing on a tooth, by application of certain minerals and with the aid of a laser beam, a flux that will homogeneously fuse with the dental enamel. Some day it might even be possible to dissect teeth using a laser. The solution of these problems, however, is subject to further research.

10. SOME LASER SAFETY PROBLEMS

To establish laser safety standards it is of fundamental importance to determine the energetic values for retinal threshold lesions. But their determination is somewhat difficult, since we are not sure which criteria should be applied to assess a retinal lesion. The term threshold lesion was differently defined by different researchers and that makes a comparison of the experimental results rather difficult. Normally the smallest lesion detectable by using the ophthalmoscope is termed a threshold. We must consider the following points, however; using the ophthalmoscope a 16 X magnification is obtained, at best; the slit lamp together with auxiliary optical systems provide a 40 X magnification of the fundus. By the use of fluorescein one may find even a much lower threshold by the detection of a possible vascular fragility. A morphologically detectable minimum lesion may be completely reversible, whereas a functional lesion that is not detectable by ophthalmoscope can sometimes result in a permanent damage. At the threshold value the reaction of the retina may be extremely strong and it may not be linear to the radiation dose. Even if the area of the lesion is small, the surrounding edema may be much larger. Unfortunately, functional studies cannot be carried out on animals, because the animal is unable to give any information on damage due to radiation. The threshold determined by ophthalmoscope can be further lowered by histological examinations; however, it is seldom possible to relate the actual functional derangement to the pathological and histological changes. By using histochemical examinations of enzyme inactivations it is possible to lower the ophthalmological threshold even by 10–15 percent. The electroretinogram (ERG) which is applied to determine the electrical reaction of the retina to certain light stimuli is also used in the determination of thresholds. Light energies that are 50 percent lower than the threshold energies determined by ophthalmoscope produce permanent changes in the ERG. Furthermore, it must be considered that the eye thresholds vary between different animal species. Such studies cannot be performed on man, and human eyes, which have to be surgically removed for other reasons are not readily available for this type of examination. Moreover, results of an examination of eyes afflicted by a primary disease would have to be interpreted with great caution. From the very small number of examinations that have been carried out, we may, however, conclude, that the retinal threshold lesions for man are higher than those for the rabbit eye, and this may be considered as a certain safety factor.

The term "threshold" seems determining the energy level causing a lesion in 50 percent of all the cases.

Using xenon and carbon arcs in pulsed operation, Ham and his staff determined the thresholds which produce a retinal coagulation in rabbits that is barely detectable. Irrespective of the size of the exposed area, the threshold energies approximate to 0.7 J/cm^2 with decreasing exposure time. It has also been found at identical energies that the effect of a ruby laser equals that of a xenon arc as far as the threshold energy is concerned. If the exposure time is reduced, the threshold energy decreases, too. In a Q-switched ruby laser with a pulse duration of 28.5 nanoseconds the threshold energy decreases to 0.07 J/cm^2 . Kotiao and his staff even found that, by using the same irradiation energy, a Q-switched ruby laser (80 nanoseconds pulse duration) required about 40 times less energy to produce a lesion than an ordinary pulsed laser with a pulse duration of 0.5 milliseconds.

Whereas the first safety principles initially were the outcome of common sense, the real safety regulations could be set up tentatively due to the continuation of the biological and physical research. The fact that the permissible maximum value of a direct eye irradiation is subject to constant changes proves that it can in no way be a matter of final regulations. Although it is still relatively easy to set up safety regulations for handling laser equipment in laboratories and industrial plants, it becomes very difficult when safety regulations for the field handling of lasers are concerned. In an industrial establishment there are always relatively few people only who might come into contact with laser beams. The necessary ophthalmological checkups do not present any problems in this case. It is rather more difficult to see how it might be possible to carry out such regular checkups within large groups.

It is imperative that all persons who might come into contact with laser beams within their jobs should be subjected to an ophthalmological examination at the beginning and at the end of their activity. Moreover, it is advisable that such checkups be carried out every six months during their employment. The following should be thoroughly examined:

- (1) the visual faculty without or, if necessary, with a correction for farsightedness and shortsightedness;
- (2) the peripheral and central visual field on both sides; the center of the retina should also be examined by means of the Amsler chart in order to discover minute damages;
- (3) motility and pupil reactions;
- (4) examination of colour vision;
- (5) examination of the anterior eye sections with a narrow pupil and especially of the lens in a mydriasis;
- (6) ophthalmoscopic examination of the fundus of the eye (mydriasis);
- (7) measurement of intraocular pressure.

The examinations must be carried out extremely thoroughly; all pathological changes must be carefully specified. If necessary, lens or fundus lesions must be photographed. This is necessary mainly because numerous pathological changes may be confused with eye damages by light, e.g., chorio-retinal scars which are of another origin. The resulting legal consequences, e.g. claims for compensation, pension requests etc. would be precarious. It might also be possible that a small hole in the retina caused by a laser beam could escape notice, which might subsequently lead to a retinal detachment.

The experts take different views on the question whether a routine fitness examination for handling laser equipment should be introduced. In our opinion, it would be very useful to set up principles of fitness. Persons having considerable defects of vision, acute or chronic eye-complaints or changes (e.g. a unilateral macula process, chorio-retinal scars, major defects of the visual fields) should not be exposed to the possible hazards of laser beams, since the condition of a bad eye would thus be deteriorated or the good eye might be damaged.

It goes without saying that certain precautionary measures must be taken when laser equipment is used in a room, so that nobody is exposed to a direct or reflected beam, nor even to a diffusely reflected beam.

But there is still a considerable uncertainty about the following: it is often recommended to have dark or black walls in the work-room, so that a possible aberrant beam is absorbed. That does not seem to us to be the right thing. If the work-room is kept too dark which would be the case with a black wall paint or black screens, there is an increased danger for the eye to be damaged by a laser beam, since the pupil widens in darkness. A room in which lasers are employed should have a minimum illumination of approximately 200 lux. It stands to reason that persons whose pupils are widened by drugs for some therapeutical or diagnostical reasons should not work with lasers for the duration of the mydriasis. The same applies to all persons suffering from a pathological widening of the pupil (condition after bruise of the eye-ball etc.).

It is essential that all persons who are likely to be exposed to laser beams should wear eye-protectors during their work. This applies not only to work in a laboratory or an industrial plant, but also to tasks in the military field during operational exercises. Importance should be attached to the fact that the protective filters used must give protection against the laser wave length concerned. If laser beams of different wave lengths are produced simultaneously, the only suitable protective filters are those which protect against all the laser beam wave lengths involved. It is obvious that such filters must have sufficient optical density for this purpose. Finally, if used in wartime, laser filters must be almost 100% transparent, since otherwise it will not be possible to use them at night.

REFERENCES

- Adler, F.
Physiology of the Eye. St. Louis, Mosby Co., 1959.
- Alexander, L.
Fälle von Sonnenfinsternisblendung. Münch. med. Wochenschr., p.1883, 1912.
- The American Conference of Governmental Industrial Hygienists. A Guide for Control of Laser Hazards, 1973.
- Beetham, W.P., Aiello, L.M., Balodimos, M.C., Koncz, L.
Ruby Laser Photocoagulation of Early Diabetic Neovascular Retinopathy. Arch. Ophthal., Vol.83, p.261, 1970.

Benkwith, K.B.

Retinal Hemorrhage as seen in Atomic Bomb Casualties. Amer. J. Ophthal., Vol.29, p.799, 1946.

Berler, D.K.

A Study of 150 Eyes Treated with Ruby Laser. Amer. J. Ophthal., Vol.64, p.114, 1967.

Bergqvist, T., Kleman, B., Tengroth, B.

Laser Irradiance Levels for Retinal Lesions. Acta Ophthal., Vol.43, p.331, 1965.

Bergqvist, T., Kleman, B., Tengroth, B.

Retinal Lesions Produced by Q-switched Lasers. Acta Ophthal., Vol.44, p.853, 1966.

Blabla, J., John, J.

The Saturation Effect in Retina Measured by Means of He-Ne-laser. Amer. J. Ophthal., Vol.62, p.659, 1966.

Birch-Hirschfeld, A.

Die Wirkung der strahlenden Energie auf das Auge. Lubarsch, O. und Ostertag, R.: *Ergänzungsband der pathologischen Anatomie des Auges*, p.483, 1910.

Birch-Hirschfeld, A.

Zum Kapitel der Sonnenblendung des Auges. Ztschr. Augenheilk., Vol.28, p.324, 1912.

Birch-Hirschfeld, A.

Über Sonnenblendung des Auges. Ber. deutsch. oph. Gesellsch., Vol.38, p.242, 1912.

Birch-Hirschfeld, A.

Die Wirkung der strahlenden Energie auf das Auge — Kritischer Sammelbericht. Ergbn. Allg. Path. u. Anat., Vol.16, p.603, 1914.

Birch-Hirschfeld, A., Stimmel

Beitrag zur Schädigung des Auges durch Blendung. Von Graefes Arch. Ophth., Vol.90, p.138, 1915.

Breitwieser, P., Herbrich, H., Nöske, H.D., Zimmermann, H.D., Kraushaar, J., Temme, H.

CO₂-Laser als Operationsinstrument in der experimentellen Urologie. Biomed. Techn., Vol.18, p.6, 1973.

Briza, J.

Eine Veränderung des Auges durch Blitzschlag. Klin. Mbl. Augenheilk., Vol.50, p.758, 1912.

Buettner, K., Rose, H.W.

Eye Hazards from an Atomic Bomb. Sight-Saving Review, Vol.23, p.194, 1953.

Byrnes, V.A., Brown, D.V.L., Rose, H.W., Cibis, P.A.

Chorioretinal Burns Produced by Atomic Flash. Arch. Ophth., Vol.53, p.351, 1955.

Byrnes, V.A., Brown, D.V.L., Rose, H.W., Cibis, P.A.

Retinal Burns — New Hazard of the Atomic Bomb. J.A.M.A., Vol.157, p.21, 1955.

Brynes, V.A., Brown, D.V.L., Rose, H.W., Cibis, P.A.

Chorioretinal Lesions due to Thermal Radiation from the Atomic Bomb. Arch. Ophth., Vol.55, 909, 1956.

Campbell, C.J., Rittler, M.C., Koester, C.J.

Laser Photocoagulation of the Retina. Trans. Amer. Acad. Ophthal., Otolaryng., Vol.70, p.939, 1966.

Campbell, C.J., Rittler, M.C., Noyori, K.S., Swope, C.H., Koester, C.J.

The Threshold of the Retina to Damage by Laser Energy. Arch. Ophth., Vol.76, p.437, 1966.

Campbell, C.J., Rittler, M.C., Swope, C.H., Koester, C.J.

Ocular Effects Produced by Experimental Lasers: I. Q-switched Ruby Laser. Amer. J. Ophthal., Vol.66, p.459, 1968.

Campbell, C.J., Rittler, M.C., Bredemeier, H., Wallace, R.A.

Ocular Effects Produced by Experimental Lasers: II. Carbon Dioxide Laser. Amer. J. Ophthal., Vol.66, p.604, 1968.

Campbell, C.J., Rittler, M.C., Innis, R.E., Shiner, W.H.

Ocular Effects Produced by Experimental Lasers: III. Neodymium Laser. Amer. J. Ophthal., Vol.66, p.614, 1968.

- Campbell, C.J., Rittler, M.C., Swope, C.H., Wallace, R.A.
The Ocular Effects Produced by Experimental Lasers: IV. The Argon Laser. Amer. J. Ophthalm., Vol.67, p.671, 1969.
- Clamann, H.G.
Netzhautschädigungen bei Fliegern. Z. f. Luftfahrtmedizin, Vol.2, p.314, 1938.
- Cogan, D.G.
Lesions of the Eye from Radiant Energy. J.A.M.A., Vol.142, p.145, 1950.
- Collier, M.M.
Evolution d'une Chorioretinite Solaire du Pôle Postérieur sur une Période de Dix Ans. Bulletin des Sociétés d'Ophtalmologie de France, p.437, 1958.
- Cordes, F.C.
Eclipse Retinitis. Amer. J. Ophthalm., Vol.31, p101, 1948.
- Curtin, T.L., Boyden, D.G.
Reflected Laser Beam Causing Accidental Burn of Retina. Amer. J. Ophthalm., Vol.65, p.188, 1968.
- De Mott, D.W., Davis, T.P.
Irradiance Thresholds for Chorioretinal Lesions. Arch. Ophth., Vol.62, p.652, 1959.
- Department of the Army
Technical Bulletin Control of Hazards to Health from Laser Radiation. TB MED 279, Headquarters, Washington DC, September 1974.
- Derr, V.E., Klein, E., Fine, S.
Free Radical Occurrence in some Laser Irradiated Biologic Materials. Fed. Press., Vol.24, p.99, 1965.
- ten Doesschate, G.
Über Gesichtsfeldstörungen bei Fliegeroffizieren. Ztschr. Augenheilk., Vol.39, p.30, 1918.
- Duke-Elder, S.
Textbook of Ophthalmology. Mosby, St. Louis, Vol.I, 1942.
- Duke-Elder, S.
Textbook of Ophthalmology. Mosby, St. Louis, Vol.VI, 1954.
- Ebbers, R.W., Dunskey, L.I.
Retinal Damage Thresholds for Multiple Pulse Lasers. Aerospace Med., p.317, 1973.
- *The Effects of Nuclear Weapons.* United States Atomic Energy Commission, 1962.
- Evans, E.I., Brocks, J.W., Schmidt, F.H., Williams, E.C., Ham, W.T., Jr
Flash Burn Studies on Human Volunteers. Surgery, Vol.37, p.280, 1955.
- Fine, S., Klein, E.
Biological Effects of Laser Radiation. Biol. Med. Physics, Vol.10, p.149, 1965.
- Fine, B.S., Fine, S., Peacock, G.R., Geeraets, W.J., Klein, E.
Preliminary Observations on Ocular Effects of High-Power-Continuous CO₂ Laser Irradiation. Amer. J. Ophthalm., Vol.64, p.209, 1967.
- Flocks, M., Zweng, H.C.
Laser Coagulation of Ocular Tissues. Arch. Ophth., Vol.72, p.604, 1964.
- Geeraets, W.J., Williams, R.C., Chan, G., Ham, W.T., Jr, Guerry, D., Schmidt, F.
The Loss of Light Energy in Retina and Choroid. Arch. Ophth., Vol.64, p.606, 1960.
- Geeraets, W.J., Williams, R.C., Ham, W.T., Jr, DuPont Guerry III
Rate of Blood Flow and its Effects on Chorioretinal Burns. Arch. Ophth., Vol.68, p.88, 1962.
- Goldman, L., Igelman, J.M., Richfield, D.F.
Impact of the Laser on Nevi and Melanomas. Arch. Dermatol., Vol.90, p.71, 1964.

- Goldman, L., Gray, J.A., Goldman, J., Goldman, B., Meyer, R.
Effect of Laser Beam Impacts on Teeth. J. Amer. Dent. Assoc., Vol.70, p.155, 1965.
- Ham, W.T., Jr, Wiesinger, H., DuPont Guerry III, Schmidt, F.H., Williams, R.C., Ruffin, R.S., Shaffer, M.C.
Experimental Production of Flash Burns in the Rabbit Retina. Amer. J. Ophth., Vol.43, p.711, 1957.
- Ham, W.T., Jr, Wiesinger, H., Schmidt, F.H., Williams, R.S., Ruffin, R.S., Shaffer, M.C., DuPont Guerry III
Flash Burns in the Rabbit Retina. Amer. J. Ophth., Vol.46, p.700, 1958.
- Ham, W.T., Jr, Geeraets, W.J., Mueller, A.H., Williams, R.C., Clarke, A.M., Cleary, St.F.
Retinal Burn Thresholds for the Helium-Neon Laser in the Rhesus Monkey. Arch. Ophth., Vol.84, p.797, 1970.
- Handlos, F., Hora, H., Langguth, G., Oettle, K.
Laser als Waffe. Wehrkunde, p.77, 2/1975.
- *Hauptverband der gewerblichen Berufsgenossenschaften.* Unfallverhütungsvorschrift: Laserstrahlen (VBG 93), April 1973.
- Helsper, J.T., Sharp, G.S., Williams, H.F., Fisher, H.W.
Biological Effect of Laser Energy on Human Melanomas. Cancer, Vol.17, p.1299, 1964.
- Hoye, R.C., Ketcham, A.S., Riggle, G.C.
The Air-borne Dissemination of Viable Tumor by High-Energy Neodymium Laser. Life Sci., Vol.6, p.119, 1967.
- Igelman, J.M., Rotte, T.C., Schecter, E., Blaney, D.J.
Exposure of Enzymes to Laser Radiation. Ann. N.Y. Acad. Sci., Vol.122, p.790, 1965.
- Jacobson, J.H., McLean
Accidental Laser Retinal Burns. Arch. Ophth., Vol.74, p.882, 1965.
- Jess, A.
Über Ringskotome durch Blendung anlässlich der letzten Sonnenfinsternis. Münch. med. Wochenschr., p.1100, 1912.
- Jess, A.
Die Ringskotome nach Sonnenblendung. Arch. Augenheilk., Vol.74, p.78, 1913.
- Jess, A.
Dauerschädigung der Gesamtnetzhaut nach Sonnenblendung. Klin. Mbl. Augenheilk., Vol.64, p.203, 1920.
- Kohtiao, A., Resnick, I., Newton, J., Schwell, H.
Threshold Lesions in Rabbit Retinas Exposed to Pulsed Ruby Laser Radiation. Amer. J. Ophthal., Vol.62, p.664, 1966.
- Lappin, P.W.
Ocular Damage Thresholds for the Helium-Neon Laser. Arch. Environ. Health, Vol.20, p.177, 1970.
- Majewski, K.
Ein weiterer Beitrag zu den Augenverletzungen durch Blitzschlag. Münch. med. Wochenschr., Vol.56, p.511, 1909.
- Medical Service
Control of Health Hazards from Lasers and Other High Intensity Optical Sources. Headquarters, Department of the Army, Washington DC, February 1974.
- Meyer-Schwickerath, G.
Lichtkoagulation. Bücherei des Augenarztes, Ferdinand Enke, Stuttgart, 1959.
- Ministère des Armées, Centre de Recherches de Médecine Aéronautique
Le Laser, ses Applications, ses Dangers pour l'Homme. France, 1974.
- Naidoff, M.A., Sliney, D.H.
Retinal Injury from a Welding Arc. Amer. J. Ophthal., Vol.77, p.663, 1974.
- Okun, E., Collins, E.M.
Histopathology of Experimental Photocoagulation in the Dog Eye. Part I: Amer. J. Ophthal., Vol.54, p.3, 1962. Part II: Amer. J. Ophthal., Vol.54, p.786, 1962. Part III: Amer. J. Ophthal., Vol.56, p.40, 1963.

- Peck, S., Peck, H.
Laser Radiation: Some Specific Dental Effects and an Evaluation of its Potential in Dentistry. J. Pros. Dent., Vol.17, p.195, 1967.
- Rose, H.W., Brown, D.V.L., Byrnes, V.A., Cibis, P.A.
Human Chorioretinal Burns from Atomic Fireballs. Arch. Ophth., Vol.55, p.205, 1956.
- Röss, Dieter
Laser, Lichtverstärker und – Oszillatoren. Akadem. Verlagsgesellschaft, Frankfurt am Main, 1966.
- Schmidt, F.H., Williams, R.C., Ham, W.T., Jr, Brooks, J.W., Evans, E.I.
Experimental Production of Flash Burns. Surgery, Vol.36, p.1163, 1954.
- Sliney, D.H., Freasier, B.C.
Evaluation of Optical Radiation Hazards. Applied Optics, Vol.12, p.1, 1973.
- Smith, R.S., Stein, M.N.
Ocular Hazards of Transscleral Laser Radiation. Amer. J. Ophthal., Vol.67, p.100, 1969.
- Solon, L.R., Aronson, R., Gould, G.
Physiological Implications of Laser Beams. Science, Vol.134, p.1506, 1961.
- Stern, R.H., Renger, H.L., Howell, F.V.
Laser Effects on Vital Dental Pulp. J. Brit. Dent. Assoc., 1969.
- Strughold, H., Ritter, O.L.
Eye Hazards and Protection in Space. Aerospace Med., Vol.31, p.670, 1960.
- Verhoeff, F.H., Bell, L., Walker, C.B.
Pathological Effects of Radiant Energy on the Eye. Proc. Mer. Acad. Arts & Sciences, p.51, 1916.
- Weale, R.A.
An Early Stage in the Pathology of Photocoagulation. Amer. J. Ophthal., Vol.53, p.665, 1962.
- Würdemann, H.V.
Formation of a Hole in the Macula: Light Burn from Exposure to Electric Welding. Amer. J. Ophthal., Vol.19, p.457, 1936.
- Zaret, M.M., Breinin, G.M., Schmidt, H., Ripps, H., Siegel, I.M.
Ocular Lesions Produced by an Optical Maser (Laser). Science, Vol.134, p.1525, 1961.
- Zaret, M.M., Ripps, H., Siegel, I.M., Breinin, G.M.
Laser Photocoagulation of the Eye. Arch. Ophth., Vol.69, p.131, 1963.

PRECEDING PAGE BLANK-NOT FILMED

PROBLEMES BIOPHYSIQUES PARTICULIERS
DE LA MEDECINE AEROSPATIALE

PRECEDING PAGE BLANK-NOT FILMED

DOSES DUES AUX RAYONNEMENTS COSMIQUES AUX ALTITUDES INFERIEURES A 25 KM

par

E.W. Fuller
A.W.R.E., Aldermaston, Berkshire,
Grande-Bretagne

1. INTRODUCTION

Les caractéristiques physiques générales des radiations cosmiques ont été bien étudiées pour l'AGARD par Altkofer¹ en 1971. Cet article décrivait la composition et le spectre d'énergie des radiations primaires et comment ces radiations étaient modulées par transmission à travers l'atmosphère et par interaction avec les champs magnétiques associés au soleil et à la terre. Le présent article traitera principalement des doses radiologiques associées à ces radiations aux altitudes utilisées par les avions militaires.

Nous avons étudié 3 tranches d'altitude: 10 000 à 13 000 m (200 g/cm²) pour les réacteurs subsoniques, 16 000 à 18 000 m (100 g/cm²) pour les avions supersoniques volant à Mach 2 environ, et 28 000 m (20 g/cm²) pour les avions volant à Mach 3.

Nous verrons que la majeure partie de la dose provient des radiations légèrement ionisantes et de neutrons d'énergie allant jusqu'à quelques MeV. Pour ces radiations, les moyens pour convertir les résultats des mesures des flux en estimations de doses sont bien établis en principe². Pourtant, une petite partie de la dose provient d'interactions nucléaires dans les tissus et, aux altitudes les plus élevées, il y a encore un flux détectable d'ions lourds fortement ionisants. Les effets biologiques de ces deux composantes peuvent être qualitativement différents de ceux des radiations légèrement ionisantes et des neutrons, de sorte qu'il convient de les considérer séparément.

2. LES DOSES PROVENANT DES RADIATIONS COSMIQUES GALACTIQUES (RCG)

2.1 Ionisation

L'ionisation produite par les RCG (radiations cosmiques ayant leur origine en dehors de système solaire) a été largement étudiée depuis plusieurs années, en particulier par Neher et Coll^{3,4}. Ces études ont établi comment la vitesse d'ionisation varie avec le temps, la latitude et l'altitude. La variation temporelle relève de la variation du champ magnétique du soleil et elle suit ainsi le cycle solaire de 11 ans. Les radiations de faible énergie peuvent pénétrer dans l'orbite terrestre quand le champ magnétique du soleil est faible. De même, le champ magnétique de la terre produit l'effet de latitude, les radiations de faible énergie pouvant atteindre des points de latitude géomagnétique élevée.

L'interaction avec l'atmosphère de la terre produit l'atténuation des radiations primaires et la génération des radiations secondaires qui sont par la suite absorbées plus profondément dans l'atmosphère. Si le spectre contient suffisamment de particules de faible énergie (latitude élevée, activité solaire minimale), l'effet net sera une réduction continue de l'ionisation avec les altitudes décroissantes. Par contre, si les effets magnétiques ont déjà supprimé les radiations de faible énergie, la vitesse d'ionisation va d'abord augmenter à mesure que l'altitude décroît typiquement jusqu'à des valeurs de profondeur de l'ordre de 100 g/cm² (les effets d'altitude sont déterminés par la quantité de matière que les radiations ont traversée, plutôt que par l'altitude en tant que telle. On montre dans la Figure 1 la relation entre l'altitude et l'atmosphère résiduelle par unité de surface pour une atmosphère standard).

La plus grande partie des mesures d'ionisation à des altitudes allant jusqu'à 20 g/cm² a été faite avec des chambres d'ionisation remplies d'argon qui sont étalonnées au sol en utilisant des champs connus de radiations gamma. Ces mesures peuvent être converties en intensité de dose absorbée si l'on suppose que les relations entre les forces d'arrêt et l'énergie requise pour former une paire d'ions pour l'argon et l'air sont les mêmes pour la composante ionisante des radiations cosmiques que pour les radiations gamma. On dit que l'intensité de la dose absorbée par les tissus est plus grande de 14% que l'intensité dans l'air pour les radiations faiblement ionisantes.

La comparaison des résultats obtenus par différents groupes de chercheurs⁵ a montré que les valeurs du groupe de Neher sont d'environ 20% plus élevées que celles de nombreux autres groupes, qui sont assez concordantes. C'est pourquoi on a utilisé les résultats de Neher pour déterminer la variation de l'intensité de la dose d'ionisation avec le temps, l'altitude et la latitude, mais les valeurs absolues ont été corrigées pour coïncider avec une vitesse moyenne d'ionisation au niveau de la mer à 45°N de 2,14 paires d'ions cm⁻³ sec⁻¹ (références 6, 7).

Pour les références voir la page 7 du texte anglais.

Les résultats obtenus sont présentés dans la Figure 2 (variation avec l'altitude à latitude élevée pour activité solaire minimale et maximale), la Figure 3 (variation pendant un cycle solaire à latitude élevée pour des altitudes choisies), et les Figures 4 et 5 (variation avec la latitude pour des altitudes choisies pour activité solaire minimale et maximale respectivement). Ces courbes s'appliquent aux doses dans de petits volumes isolés de tissu ou en pratique, aux doses au niveau des extrémités. Pourtant, comme cette composante de la dose varie comparativement lentement avec la profondeur, sauf pour les altitudes les plus élevées, elles sont aussi une mesure raisonnable de la dose à travers le corps (dose intégrale).

Ces courbes montrent que dans le domaine des altitudes présentant un intérêt l'intensité de dose varie peu entre 60° et 90° de latitude géomagnétique et que la modification de cette valeur (maximale) à l'équateur magnétique varie entre un facteur de 6 (altitude élevée, activité solaire minimale) et 2,5 (basse altitude) en fonction de l'altitude et de la phase du cycle solaire. La variation pendant le cycle solaire est la plus grande aux altitudes et latitudes élevées, étant d'un facteur d'environ 1,8; il y a beaucoup moins de variation avec le temps près de l'équateur.

Pendant une période d'activité solaire maximale, à latitude élevée, l'intensité maximale provenant de cette composante est à peu près de $400 \mu\text{rad/h}$, ce qui se produit dans la tranche de 50 g/cm^2 . Pour une période d'activité solaire minimale l'intensité augmente continuellement avec l'altitude, atteignant $750 \mu\text{rad/h}$ à 20 g/cm^2 .

2.2 Les Doses par les Neutrons

Il n'y a pas de neutrons dans les radiations galactiques primaires; ils sont tous produits par les interactions nucléaires de ces radiations avec la matière à travers laquelle elles passent. Ceci aboutit d'abord à des neutrons de deux groupes d'énergie: des neutrons d'énergie très élevée qui emportent une partie substantielle de l'énergie des particules primaires, et des neutrons "d'évaporation" de faible énergie de l'ordre de 1 MeV. Les neutrons d'énergie élevée peuvent déclencher eux-mêmes des réactions nucléaires produisant plus de neutrons des 2 groupes; le groupe de faible énergie est dégradé encore en énergie par collision avec les noyaux de l'air. Le spectre résultant couvre une gamme d'énergie très large (10^{-8} à 10^3 MeV). Plusieurs calculs ont été faits sur le spectre de neutrons créé par les rayons cosmiques de l'atmosphère; les plus anciens⁸ indiquent que des neutrons d'énergie inférieure à 10 MeV constituent 80% de la dose. Les calculs plus récents^{9,10} montrent que près de la moitié de la dose vient des neutrons d'énergie plus élevée.

On peut obtenir une information systématique sur la variation de la dose par les neutrons avec le temps, l'altitude et la latitude dans de nombreuses études sur le rapport entre le flux des neutrons atmosphériques et ces paramètres, études entreprises par plusieurs groupes de physiciens des rayons cosmiques au cours du cycle solaire actuel et du précédent^{11,12,13,14}.

Merker et Coll¹⁴ ont comparé leurs résultats à ceux de nombreux autres chercheurs et ils se trouvent généralement en accord jusqu'à 20%. On trouve une semblable concordance avec les calculs théoriques des distributions du flux⁹. Pourtant, vu la grande dispersion en énergie du spectre et la sensibilité à l'énergie de la conversion du flux en dose, les calculs théoriques n'ont été utilisés que pour déterminer la variation de la dose due aux neutrons; la valeur absolue a été établie d'après une mesure directe en un point donné.

On a deux mesures indépendantes^{15,16} pour l'intensité de la dose due aux neutrons à environ 21 000 m au-dessus de Fort Churchill au moment de l'activité solaire minimale entre le 19ème et le 20ème cycle (1965). L'une, référence 15 a été faite avec un détecteur conçu pour mesurer l'équivalent de dose pour les neutrons d'énergie allant jusqu'à 14 MeV. L'autre, référence 16, a été faite avec des émulsions nucléaires et a donné la dose et l'équivalent de dose provenant de protons de recul d'énergie inférieure à 20 MeV; elle établit donc une limite inférieure pour la dose neutronique. Les deux mesures ont donné un résultat de $500 \mu\text{rem/h}$ pour l'intensité d'équivalent de dose pour les neutrons "de faible énergie". Le facteur de qualité dérivé des mesures utilisant des émulsions montre que cette intensité correspond à $0,19 \text{ mrad/h}$. C'est l'intensité due essentiellement aux protons de recul d'énergie inférieure à 20 MeV dans un petit volume isolé de tissu. On expose plus loin que la majeure partie de la dose provenant des neutrons d'énergie beaucoup plus élevée que 20 MeV est due à des réactions nucléaires et elle est donc enregistrée dans la dose due aux étoiles.

La distinction entre l'irradiation de petits ou de grands volumes est beaucoup plus importante dans le cas de la composante neutronique que dans celui de la composante ionisante. La dose produite par un flux donné de neutrons dans un petit volume isolé (extrémité) est environ le double de la dose moyenne produite dans une sphère de 30 cm de diamètre par le même flux. Comme c'est courant dans la pratique de la protection radiologique, la plus grande dose résultant de la considération d'un petit volume a été utilisée pour dresser les courbes données dans les Figures 2, 6 et 7 qui montrent la variation de l'intensité de la dose absorbée provenant des neutrons en fonction de l'altitude (Figure 2) et de la latitude pour les phases d'activité minimale et maximale du cycle solaire (Figures 6 et 7).

Comme pour les radiations ionisantes, ces courbes indiquent la même dépendance de la latitude, mais comme on peut s'y attendre d'après la façon dont les neutrons sont produits il y a toujours une agglomération de neutrons du haut de l'atmosphère jusqu'à 100 g/cm^2 environ.

2.3 Les Étoiles Nucléaires

Les collisions nucléaires qui produisent les neutrons dont nous avons parlé plus haut produisent aussi des particules chargées: du carbone et des noyaux plus légers dans le cas de collisions avec des tissus. Ces particules ont habituellement une densité d'ionisation élevée le long de leur trajet (en comparaison avec les radiations cosmiques primaires) et, particulièrement du fait que plusieurs prennent naissance en un point, elles produisent une densité élevée de transfert d'énergie (c'est-à-dire une dose locale élevée) en ce point. Pour cette raison, il est préférable de considérer cette composante de la dose séparément, plutôt que de la traiter simplement comme une partie de la composante ionisante et neutronique. Comme nous l'avons souligné plus haut, la particule déclenchante peut être un neutron d'énergie élevée: si la dose due aux étoiles est considérée séparément, cette composante de la dose par les neutrons ne doit pas être incluse dans la "dose par les neutrons" étudiée au paragraphe précédent. C'est la raison pour laquelle les estimations de dose neutronique limitées aux neutrons d'énergie inférieure à 20 MeV environ y avaient été utilisées.

Les étoiles nucléaires sont le plus couramment observées dans les émulsions nucléaires; malheureusement celles-ci contiennent des noyaux à Z élevé (Ag et Br) qui sont tout à fait différents des noyaux des tissus et la plupart des réactions se font dans ces noyaux. En chargeant l'émulsion avec du glycérol¹⁷ ou en modifiant le rapport de la gélatine au sel halogène d'argent¹⁵, il est possible de déterminer statistiquement le nombre d'étoiles avec un nombre donné de ramifications se produisant dans chaque type de matériau. Ces mesures ont été faites à 21 500 m environ à Fort Churchill pendant la période d'activité solaire minimale de 1964/65.

Shen¹⁸ donne une série de courbes montrant la variation de la fréquence des étoiles dans les tissus avec les altitudes et la latitude, basée sur des mesures en chambre de Wilson en montagne et un traitement théorique dû à Lingenfelter. La valeur déduite de ces courbes pour les mesures à Fort Churchill concorde dans la limite de 20% avec les valeurs observées et elles ont donc servi à construire les Figures 8 et 9 qui montrent que la fréquence des étoiles est fonction de la latitude à diverses altitudes pour des périodes d'activité solaire minimale et maximale.

L'intérêt radiobiologique associé à l'étoile est la quantité d'énergie déposée "localement" avec un TLE élevé (TLE - transfert linéaire d'énergie - exprimé habituellement en keV/ μ ou MeV/g/cm²). Bien que ce concept soit assez vague, l'étude de la gamme des corps à TLE élevé qui peuvent être produits lui pose une limite de l'ordre de 50 MeV par étoile. En adoptant cette valeur on a le facteur (1 étoile/g/h produit 0,8 μ rad/h) pour convertir la fréquence des étoiles en intensité de dose absorbée. On voit alors que l'intensité de la dose des étoiles est environ 5% de celle de la dose par ionisation; pourtant, comme nous en parlerons plus loin, l'effet biologique relatif peut être beaucoup plus grand que cela ne l'implique.

2.4 Les Ions Lourds

Environ 1,5% des particules des radiations primaires ont $Z > 2$; elles ont pratiquement toutes $Z < 28$ et la plupart des particules de ce "groupe lourd" ont un Z compris entre 6 et 9. Les spectres d'énergie, s'ils sont exprimés en termes de MeV/nucléon, ont une forme semblable pour toutes les charges, de sorte que comme la vitesse de perte d'énergie varie approximativement comme Z^2 , le nombre relatif d'ions lourds décroît rapidement quand les radiations pénètrent dans l'atmosphère. Néanmoins ils sont encore détectables à des altitudes plus élevées que 16 500 m. Le trajet des ions lourds a 2 traits caractéristiques:

(1) La vitesse minimum de perte d'énergie est proportionnelle à Z^2 , de sorte que ces ions lourds ont de longues portions de leur trajet où le TLE est plus grand que celui qui est atteint par les protons à la fin de leur trajectoire, c'est-à-dire qu'un ion de néon d'énergie élevée ($Z = 10$) a une portion de trajet de 1000 μ où le TLE est plus grand que 100 keV/ μ , la longueur correspondant du trajet des protons étant de 10 μ .

(2) La vitesse maximum de perte d'énergie, atteinte près de la fin du trajet, varie aussi comme Z^2 , et le TLE atteint ainsi des valeurs jamais obtenues par les particules plus légères: par exemple, le TLE pour un ion de néon dépasse 1,500 keV/ μ à 20 μ de la fin de son trajet.

Il est possible que ces deux caractéristiques puissent donner des effets non observés avec les radiations à TLE faible, de là vient l'intérêt spécial porté à ces particules.

Les Figures 10 et 11 sont adaptées d'un rapport de Allkofer¹⁹ et montrent les résultats obtenus par son groupe et ceux de Webber. La Figure 10 montre comment le flux d'ions lourds varie avec les altitudes, la Figure 11, la densité des fins de trace, c'est-à-dire le nombre de régions très lourdement ionisées correspondant à la fin du trajet.

On peut noter que l'intensité de dose absorbée associée à ces fins de trace d'ions lourds est très faible: une intensité de 3×10^{-2} fins de trace/cm³/h avec $Z = 10$ déposerait, moins de 30 MeV/g/h soit environ 0,5 μ rad/h.

2.5 Intensité d'Équivalent de Dose

L'intensité de dose absorbée, dont nous avons parlé plus haut, peut être convertie en dose équivalente en dose en utilisant la relation entre le TLE et le facteur de qualité recommandé par l'ICRP²⁰. Une fois que l'on connaît la répartition du TLE, (l'équivalent de dose (rem) = dose absorbée (rad) \times facteur de qualité).

AD-A035 844



ADVISORY GROUP FOR AEROSPACE RESEARCH AND DEVELOPMENT--ETC F/G 6/18
BIOPHYSICAL PROBLEMS IN AEROSPACE MEDICINE (PROBLEMS BIOPHYSIQU--ETC(U)
DEC 76

UNCLASSIFIED

AGARD-AR-84

NL

2 OF 2
AD
A035844

END END

DATE DATE
FILMED FILMED
8-77 8-77

On peut savoir la répartition du TLE d'après les calculs théoriques²¹ qui montrent que la majeure partie des radiations primaires a un TLE faible (FQ = 1), la composante à TLE élevé provenant de fragments chargés de collisions nucléaires et de neutrons. Les mesures avec les émulsions nucléaires¹⁶ montrent que le facteur de qualité de la partie de faible énergie (< 20 MeV) du spectre des neutrons est de 2,6. Les données expérimentales sur les étoiles nucléaires sont encore rares. Les mesures d'émulsion à 21 500 m à Fort Churchill^{15,17} donnent une intensité d'équivalent de dose, venant de cette composante, d'environ 0,4 mrem/h (0,05 mrad/h avec un FQ de 8).

Ces chiffres aboutissent à un FQ de 1,74 aux latitudes et altitudes élevées pour activité solaire minimale. Le chiffre concorde remarquablement avec ceux de Cowan et Coll²² qui ont utilisé un spectromètre de Rossi²³ dans des vols à 13 000, 16 000 et 20 000 m en 1971. Ceci suggère que les composantes à TLE élevé des étoiles nucléaires augmentent effectivement à 1,5 le FQ de toute la composante ionisante. L'intensité totale d'équivalent de dose peut ainsi être obtenue en appliquant l'expression:

intensité totale d'équivalent de dose = (dose par ionisation x 1,5) + (intensité de dose due aux neutrons x 2,6).

L'intensité d'équivalent de dose obtenue de cette façon pour des périodes d'activité solaire minimale et maximale est représentée dans les Figures 12 et 13. Elle ne comprend pas la contribution des ions lourds, mais elle comporte l'hypothèse que l'équivalent de dose provenant des étoiles nucléaires peut être calculé de la même façon que pour les trajets à TLE élevé isolés.

3. RAYONS COSMIQUES SOLAIRES (RCS)

Les rayons cosmiques solaires sont émis par le soleil en association avec quelques-unes des plus grandes éruptions solaires. La majeure partie des particules atteignant la terre sont des protons, aussi les phénomènes donnant lieu aux RCS sont-ils appelés événements solaires à protons (ESP). La fréquence des ESP suit le cycle solaire de 11 ans, mais dans les années actives, ils se produisent au hasard. Ils varient aussi grandement quant à leur importance (nombre de protons émis), leur durée et leur spectre d'énergie. Ils sont tous pourtant beaucoup moins énergétiques que les radiations galactiques.

Les données sur le 19ème cycle solaire (1954-65) ont été revues par McDonald²⁴ et Shen²⁵, celles sur le 20ème cycle allant jusqu'en 1971, par Atwell²⁶.

Quelques-uns des événements les plus importants auraient donné lieu à de très grandes doses dans l'espace, de sorte qu'il est capital d'étudier les implications de ces phénomènes pour les voyages dans l'espace et c'est ainsi que le soleil a été continuellement contrôlé par des détecteurs sur satellite depuis plusieurs années.

Cependant, comme les événements sont irréguliers, pratiquement imprévisibles et brefs (typiquement de quelques heures), il a été extrêmement difficile d'en faire des mesures aux altitudes atteintes par les avions. De sorte que la majeure partie de nos connaissances actuelles sur l'intensité de dose que produisent ces événements aux altitudes des avions nous vient des calculs de la transmission des radiations à travers l'atmosphère^{27,28}. Les éruptions solaires perturbent souvent le champ magnétique terrestre, et les protons solaires peuvent ainsi atteindre des régions qui en seraient normalement magnétiquement protégées. Mais les calculs négligent en général cette protection magnétique et donnent ainsi l'intensité maximale de dose produite.

Comme les protons primaires des RCS ont une faible énergie (comparés aux RCG), les neutrons secondaires qu'ils produisent sont beaucoup plus pénétrants que les protons eux-mêmes. De sorte qu'aux profondeurs de l'atmosphère considérées ici, l'équivalent de dose venant des neutrons est toujours une partie significative du total et aux profondeurs dépassant 100 g/cm², il en est la majeure partie²⁷.

Fuller et Simon²⁹ ont calculé l'intensité d'équivalent de dose produite à 100 g/cm² par les ESP du 19ème cycle solaire et ceux du 20ème cycle jusqu'en 1971 en supposant que tous les événements avaient un spectre de rigidité exponentielle c'est-à-dire que le flux des protons ayant une rigidité plus grande que P est donné par:

$$N = N_0 \exp(-P/P_0).$$

N_0 , le flux total des protons, et P_0 la rigidité caractéristique peuvent être déterminés d'après les mesures du nombre des protons au-dessus de deux niveaux d'énergie. Leurs résultats pour le 19ème cycle ont été étendus pour donner aussi l'intensité de dose à 20 g/cm², et est indiquée dans le Tableau I. Le cycle actuel (20ème) est de faible activité, sauf pendant une période d'août 1972 où il s'est produit deux grands événements. On donne dans la Figure 14 pour le plus grand le profil de l'intensité d'équivalent de dose à 20 et 100 g/cm² obtenue en appliquant la méthode de calcul de Fuller et Simon²⁹ aux données fournies par des sondes portées sur satellite³⁰.

La variation de l'intensité de dose ou d'équivalent de dose avec l'altitude peut être calculée pour les événements sur les spectres desquels nous disposons de renseignements détaillés; plusieurs études de ce genre ont été conduites pour l'éruption géante de février 1956. On montre dans la Figure 15 pour cet événement la variation de l'intensité maximale de dose avec l'altitude obtenue par Armstrong³¹. En général, pourtant, on n'obtient pas d'informations détaillées sur le spectre, et il faut alors adapter les deux ou trois mesures dont on dispose à une loi spectrale supposée.

Si l'on emploie la loi de la rigidité exponentielle il résulte que pour les altitudes comprises entre 60 et 200 g/cm² la réduction de l'intensité d'équivalent de dose en fonction de la baisse de l'altitude ne dépend pas grandement de l'index de rigidité²⁹, comme elle le fait entre 20 et 60 g/cm² (Figure 16).

4. CONSIDERATIONS OPERATIONNELLES

La dose maximale annuelle proposée par l'ICRP²⁰ pour les personnes exposées professionnellement est de 5 rem. Pour d'autres (en supposant qu'elles ne constituent pas une grande fraction de la population) elle est de 0,5 rem. Est-il possible de considérer le personnel navigant comme "exposé professionnellement" mais pas le passager moyen.

Les résultats des paragraphes précédents ont été présentés en intensité de dose et en intensité d'équivalent de dose/h. En général, les vols sont entrepris pour transporter du personnel ou du matériel d'un point à un autre, ou pour faire des levés aérophotogrammétriques, de sorte que nous sommes en réalité plus intéressés à l'équivalent de dose reçu au cours d'un voyage. Il est important de faire une distinction quand l'on compare les conséquences radiobiologiques d'exploitation dans les trois différentes tranches d'altitude considérées, étant donné que ces trois tranches sont utilisées par des avions volant à des vitesses différentes. Le Tableau II donne l'équivalent de dose et le nombre des fins de trace des ions lourds/cm³ venant des RCG, par 10 000 milles à 20, 100 et 200 g/cm², sur les routes de latitude élevée, moyenne et équatoriale, en supposant que l'avion vole dans ces tranches à 1800, 1200 et 600 mph respectivement. On voit que l'équivalent de dose est toujours faible, et que les doses du voyage décroissent quand l'altitude augmente. Par contre, le nombre d'interactions des ions lourds s'élève rapidement en fonction de l'altitude. Cette augmentation équilibrerait le "gain" de dose réalisé à 20 g/cm² si les ions lourds étaient environ 1000 fois plus nocifs (pour un dépôt d'énergie donné) que le reste des radiations.

Bien que les RCS puissent donner lieu à des intensités de dose qui sont très grandes comparées à celles des radiations galactiques, la probabilité de rencontrer un tel phénomène, établie en moyenne sur le cycle de 11 ans, est si faible que la dose moyenne provenant des RCS est toujours petite comparativement aux RCG, spécialement du fait que les RCS ne vont pas affecter les régions qui sont fortement protégées par le champ magnétique.

Si l'on considère la plus mauvaise année du 19ème cycle la dose moyenne de dose des RCS à 100 g/cm² était d'environ 0,75 mrem/h, et 5 mrem/h à 20 g/cm². De sorte qu'en faisant une moyenne pour les années en particulier, la dose venant des RCS pourrait être considérablement plus grande que celle venant des RCG.

L'étude de l'effet des RCG est compliquée par la possibilité de prendre des échappatoires. Celles-ci sont proposées pour les TSS commerciaux qui peuvent descendre jusqu'en haut de la tranche subsonique sans diminuer grandement leur vitesse. De sorte que l'équivalent de dose venant d'une rencontre avec un ESP peut être réduit d'un facteur de 4 environ; en fait l'équivalent de dose serait alors inférieur à celui subi par un avion subsonique empruntant la même route. La sanction de cette manoeuvre est l'augmentation de la consommation du combustible.

Vu la probabilité très faible de l'apparition d'événements délivrant un équivalent de dose approchant le maximum annuel pour les avions volant à 100 g/cm², cela peut être considéré comme un risque acceptable pour l'aviation militaire.

Des équivalents de dose considérablement plus élevés se rencontreraient en plus grande fréquence dans les avions volant à 20 g/cm², et ceci peut demander la mise au point d'une technique d'échappement si cette tranche d'altitude devient largement utilisée.

TABLEAU I

Nombre d'événements solaires à protons du 19ème cycle dépassant des niveaux
choisis d'intensité d'équivalent de dose

Intensité d'équivalent de dose R mrem/h	2 000	1 000	500	200	100	50	20	10	5	2	1
Nombre dépassant R à 20 g/cm ²	1**	3	4	9	10	12	19	24	26	31	35
Nombre dépassant R à 100 g/cm ²				1*	1	2	4	9	13	17	24

* 23 Fév. 56 500 m rem/h

** 23 Fév. 56 2 400 m rem/h

TABLEAU II

Doses pour un voyage de 10 000 milles à diverses altitudes

Equivalent de dose (mrem/10 000 milles)				
Epaisseur de l'atmosphère g/cm ² Latitude	20	100	200	
75	8,8	11,5	12,8	Activité solaire minimale
40	3,5	6,6	8,7	
10	1,1	2,3	3,6	
75	4,6	7,1	8,9	Activité solaire maximale
40	2,7	4,4	7,4	
10	0,9	2,1	3,4	
	Fins de trace/cm ³ /10 000 milles			
	4,5 x 10 ⁻¹	8,3 x 10 ⁻³	Non mesuré	

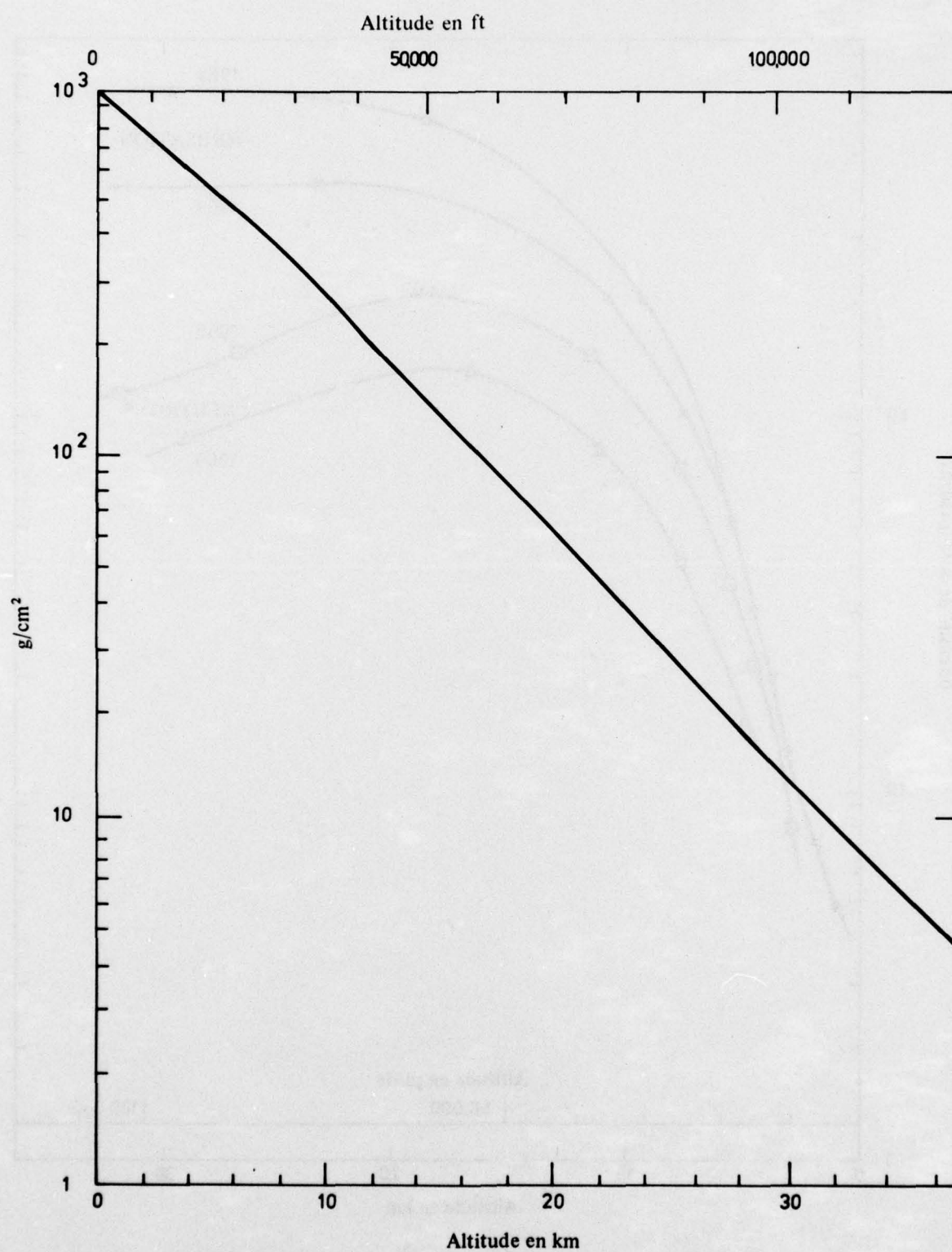


Fig.1 Relation entre l'altitude et l'atmosphère résiduelle (g/cm^2)

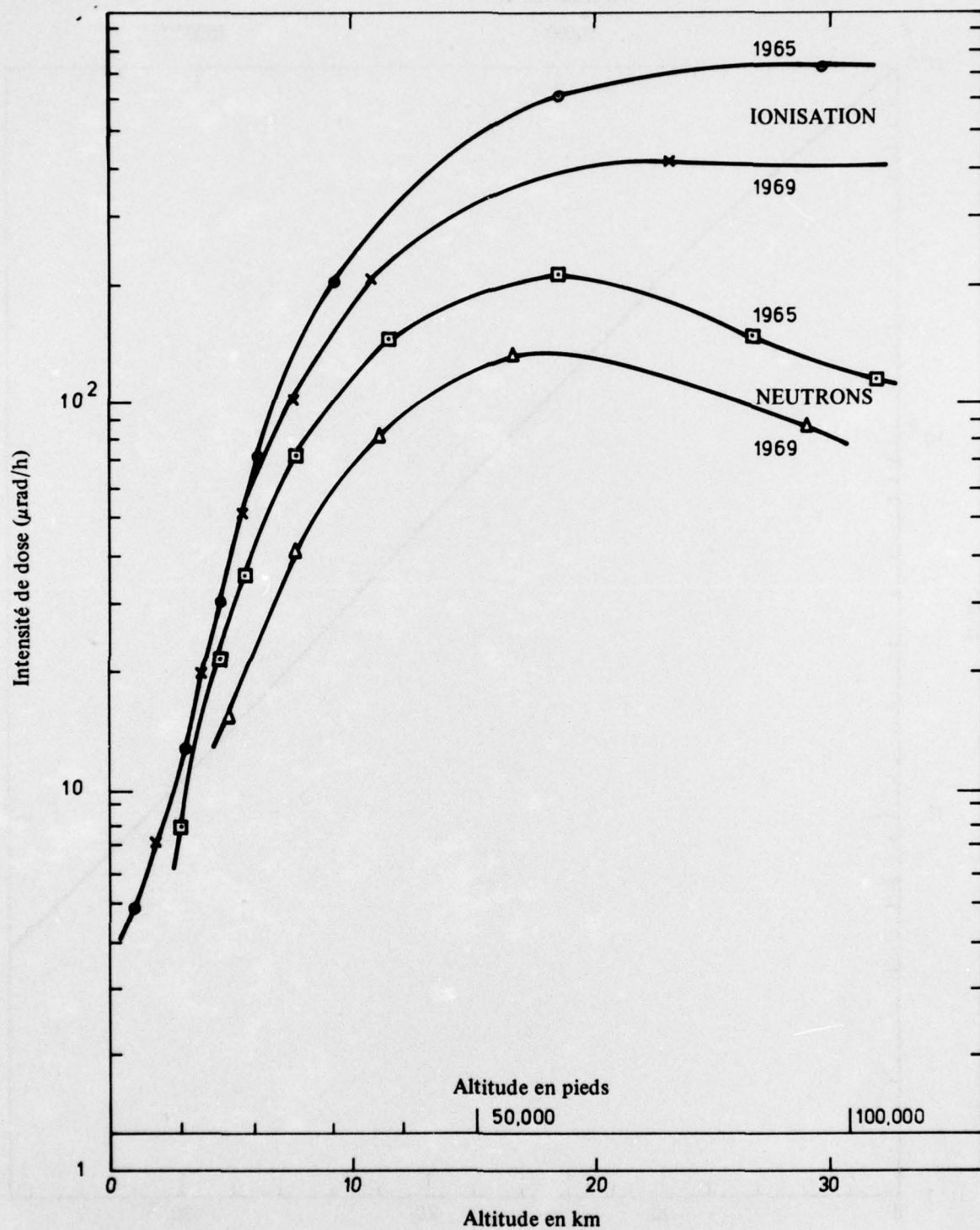


Fig.2 Variation de l'intensité de dose avec l'altitude (latitude élevée)

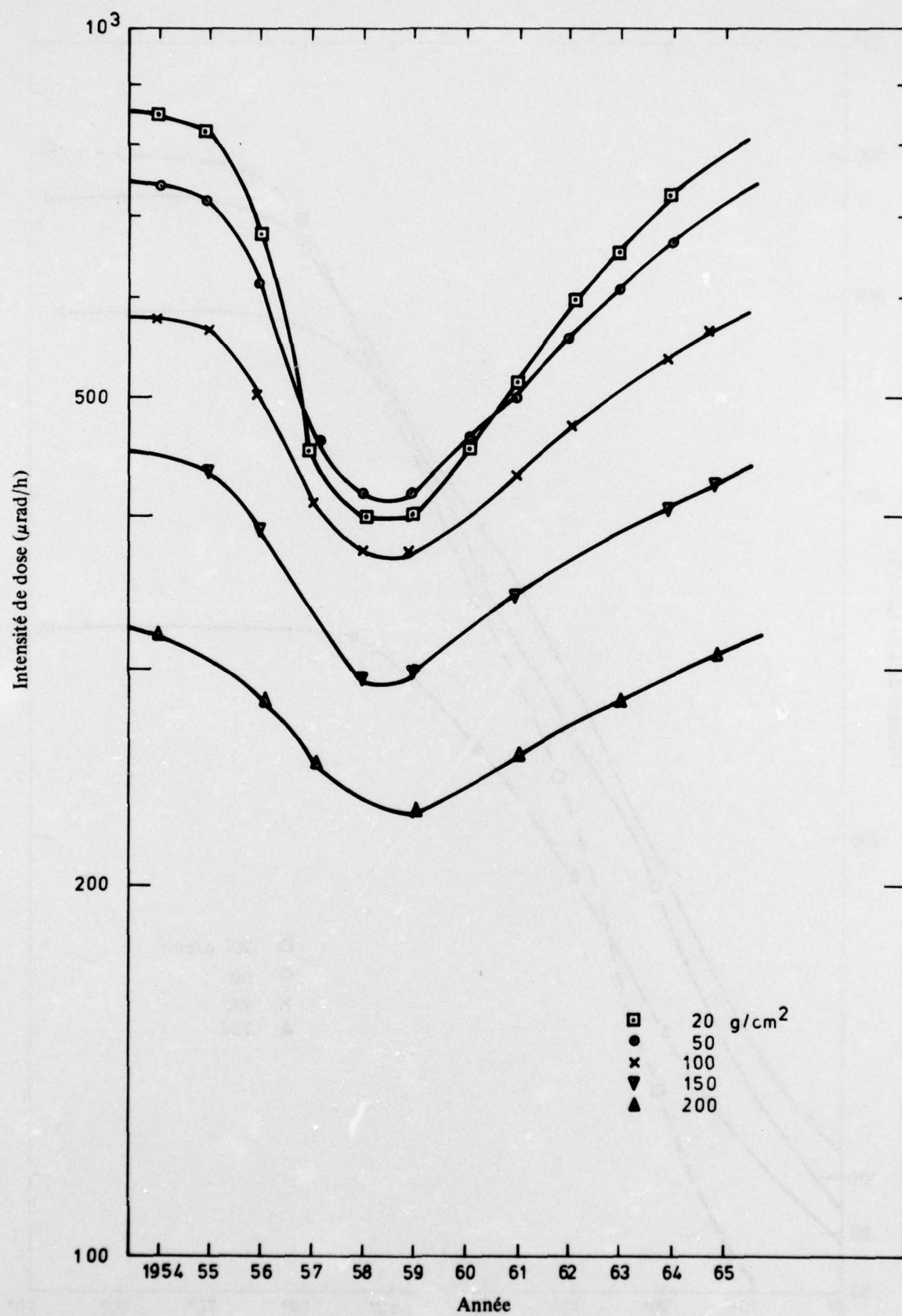


Fig.3 Variation de l'intensité de la dose par ionisation aux latitudes élevées

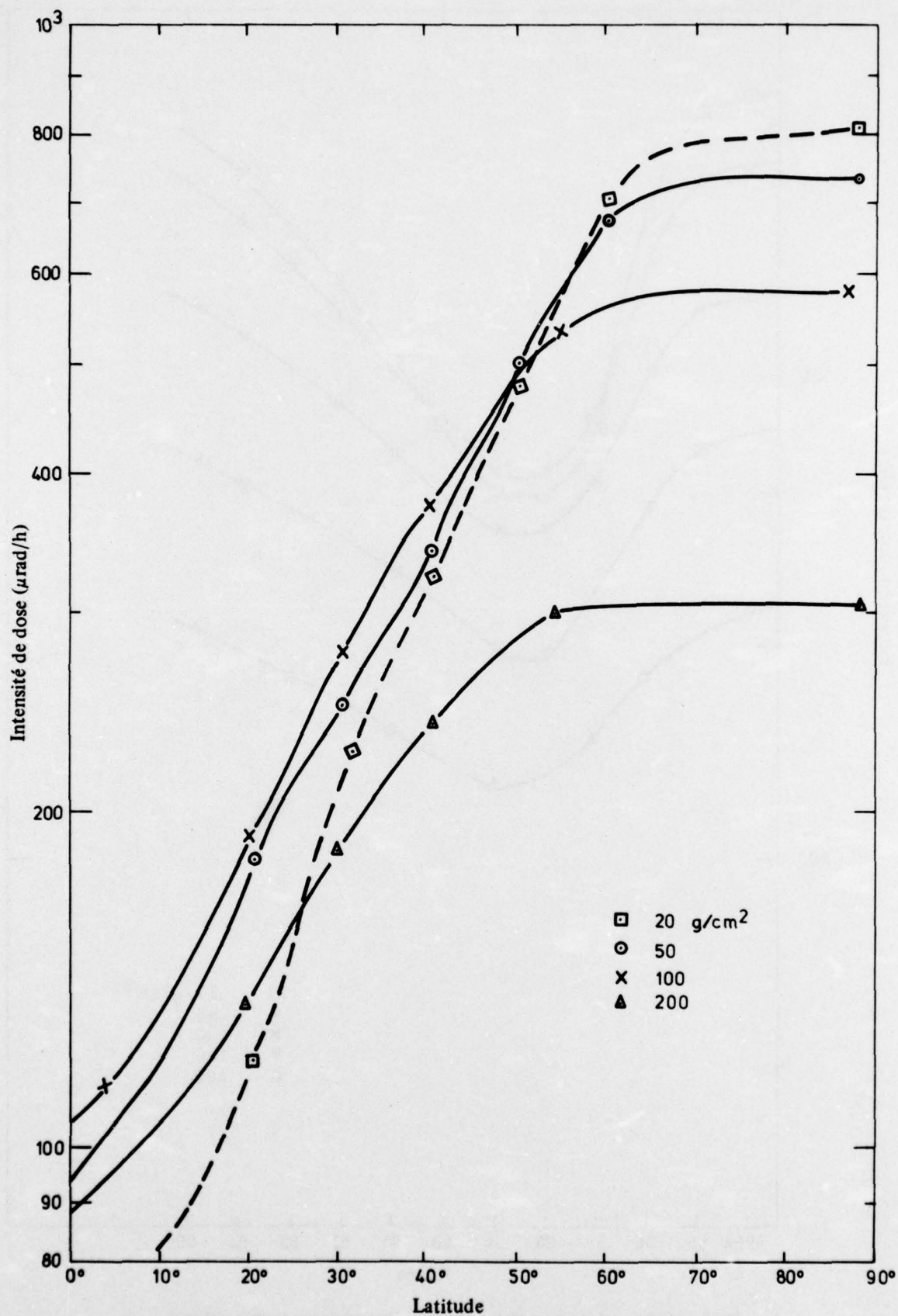


Fig.4 Variation de l'intensité de la dose par ionisation en fonction de la latitude (activité solaire minimale)

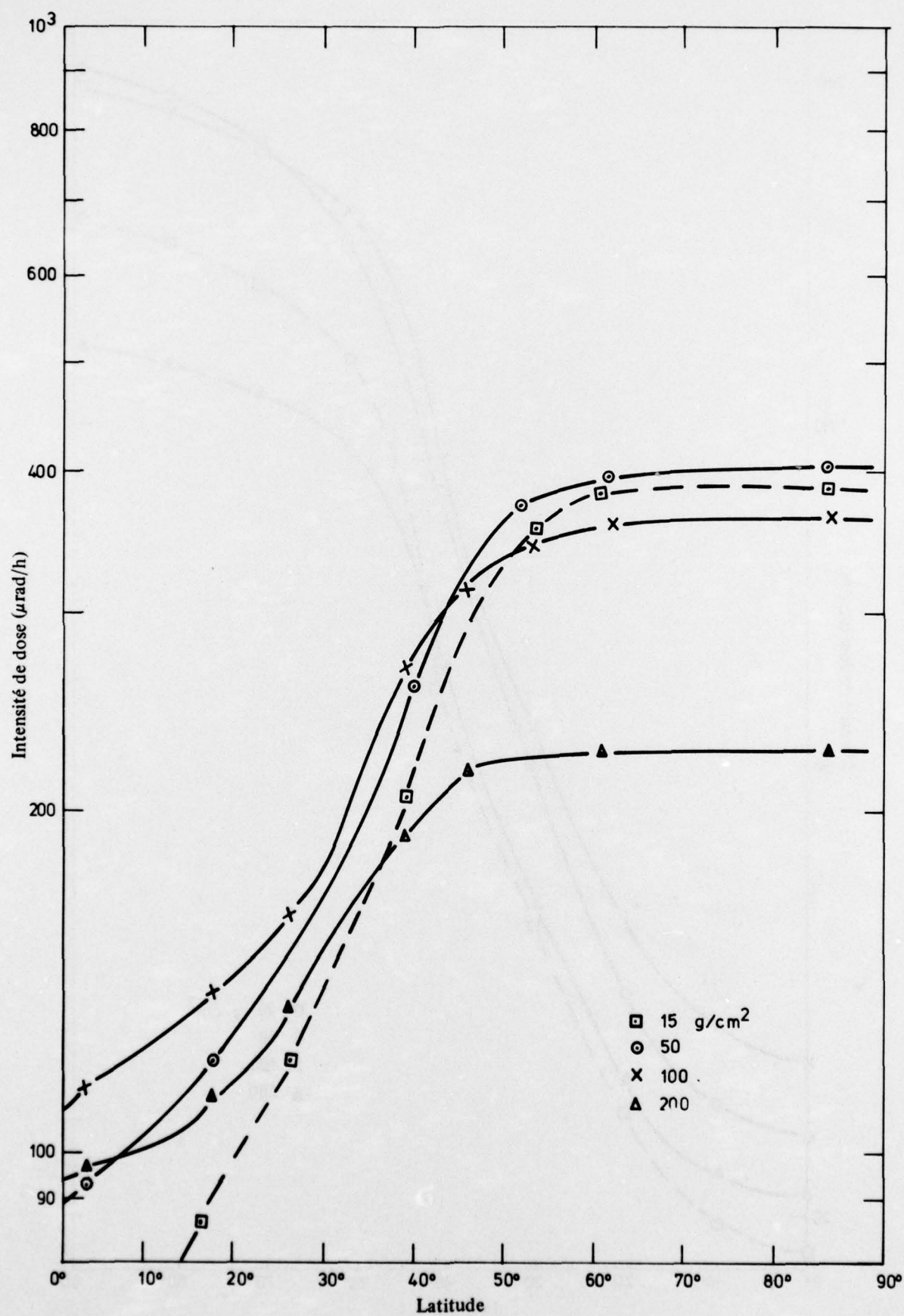


Fig.5 Variation de l'intensité de la dose par ionisation en fonction de la latitude (activité solaire maximale)

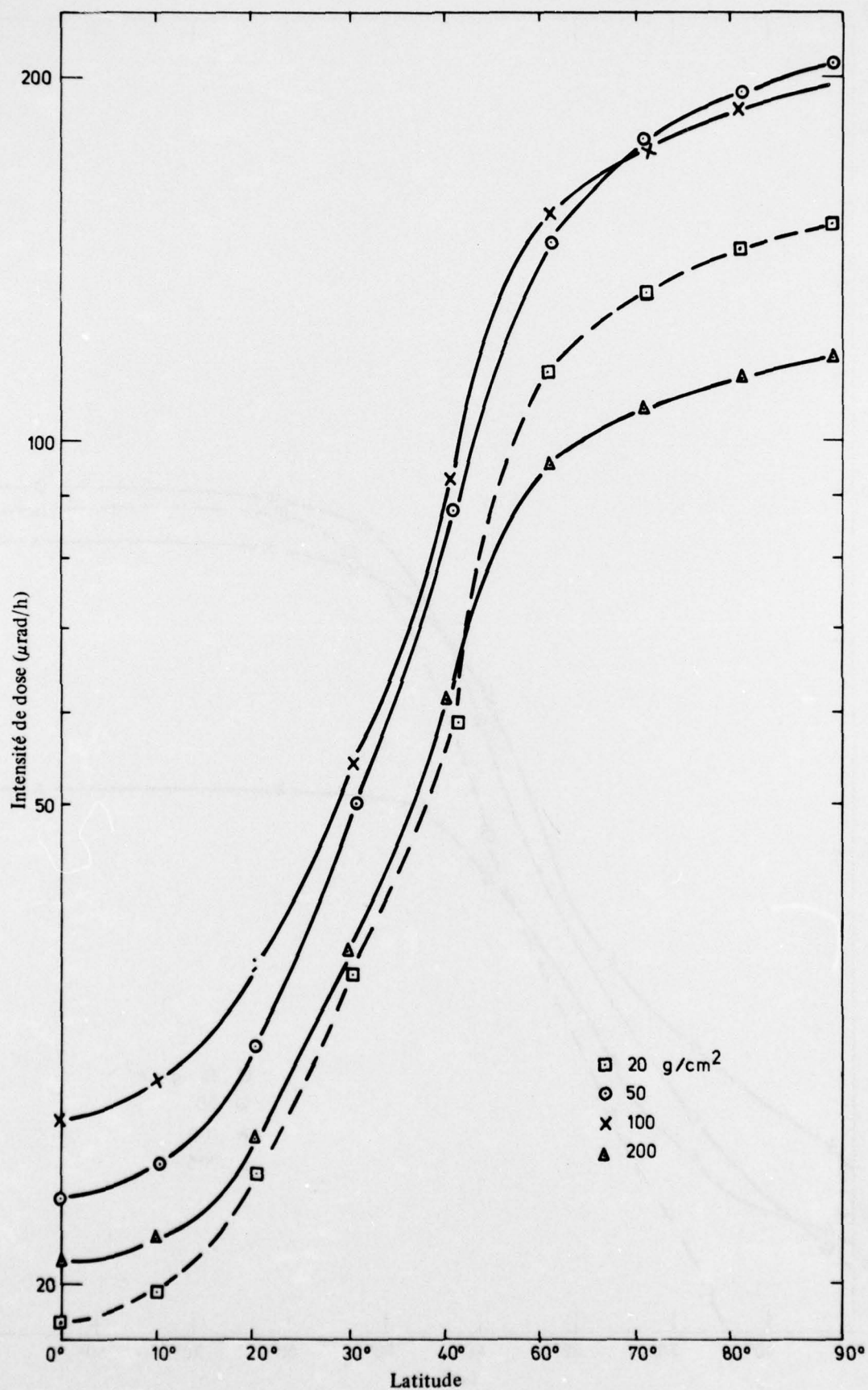


Fig.6 Variation de l'intensité de la dose due aux neutrons en fonction de la latitude (activité solaire minimale)

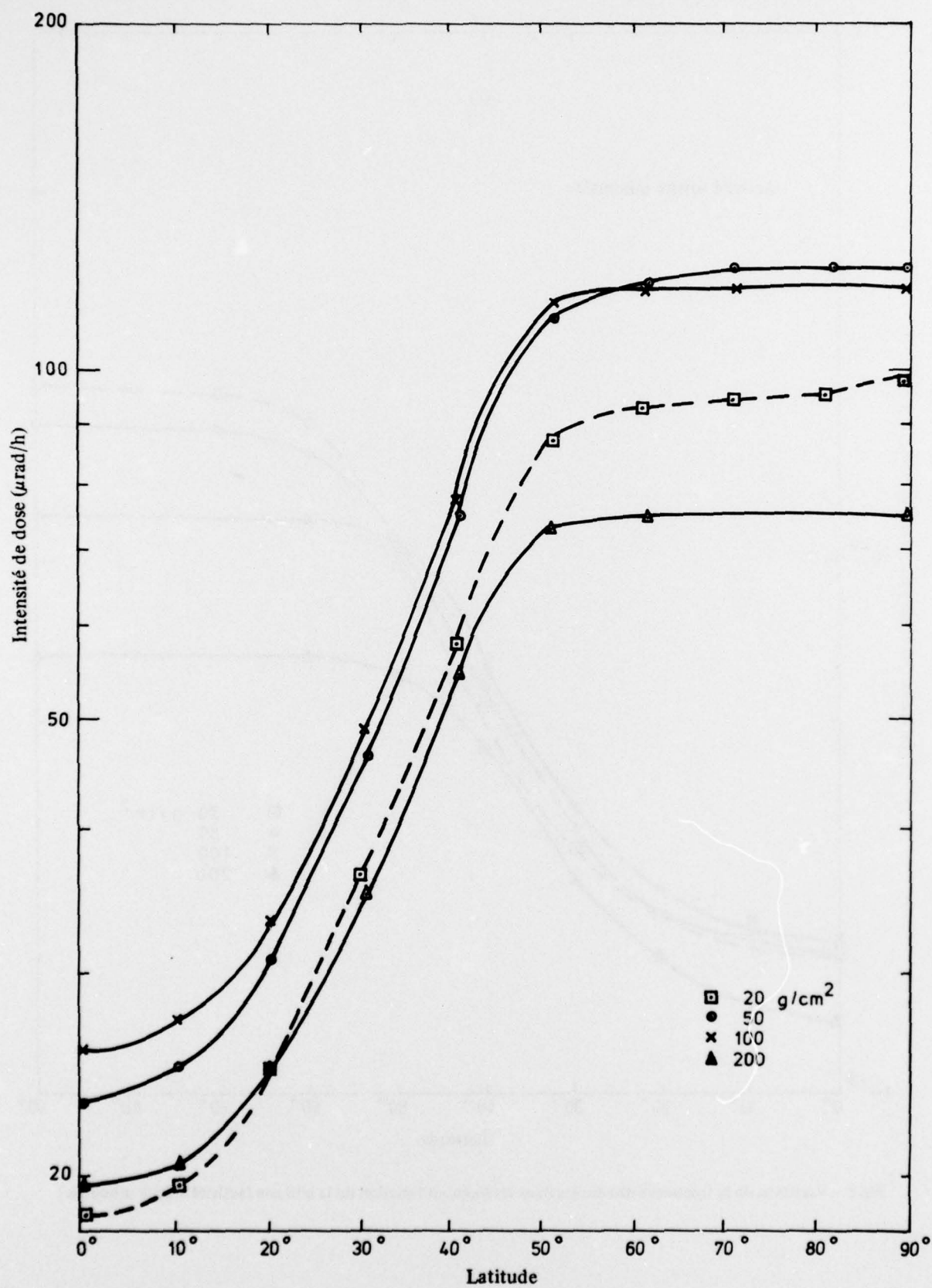


Fig.7 Variation de l'intensité de la dose due aux neutrons en fonction de la latitude (activité solaire maximale)

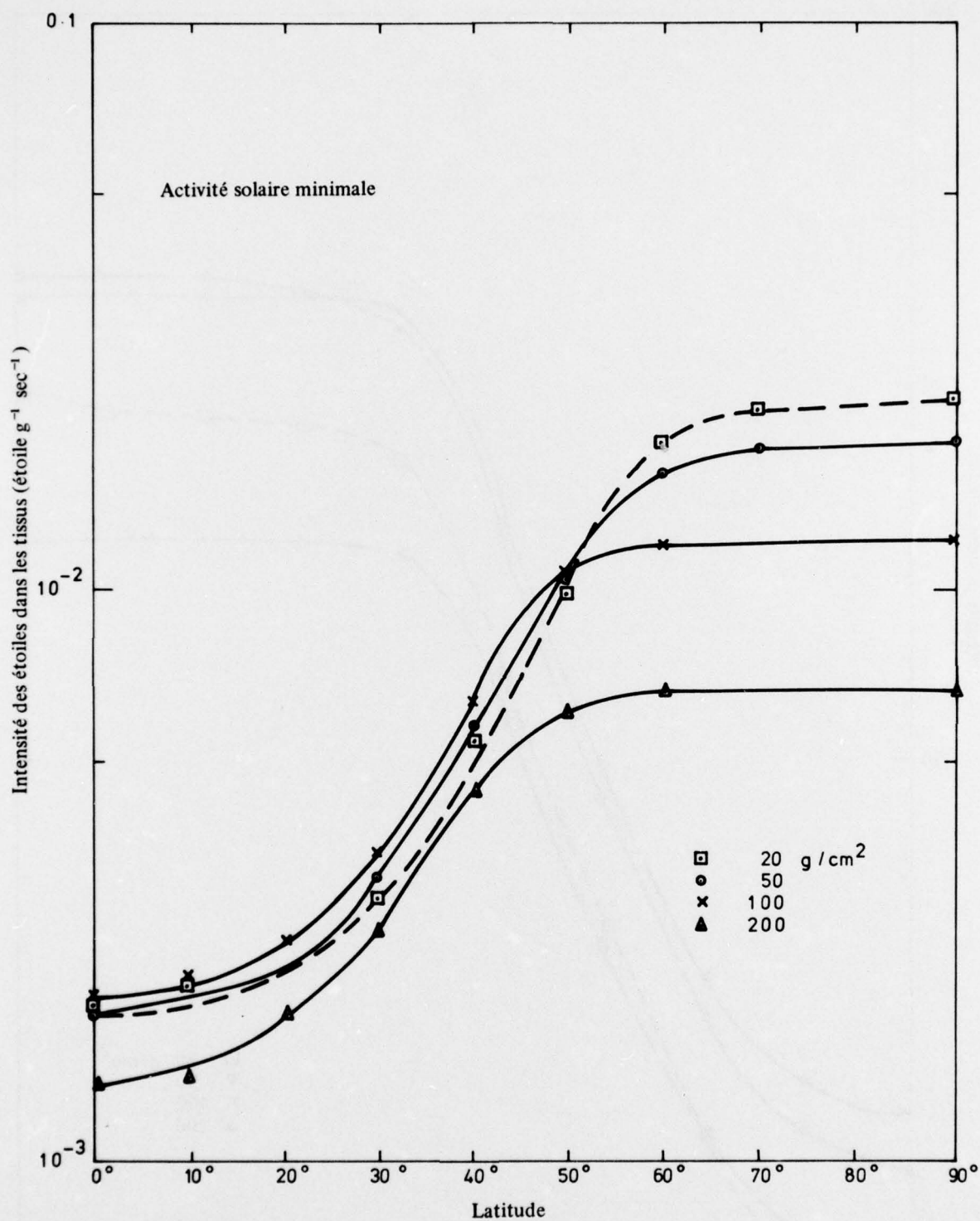


Fig.8 Variation de la fréquence des étoiles dans les tissus en fonction de la latitude (activité solaire minimale)

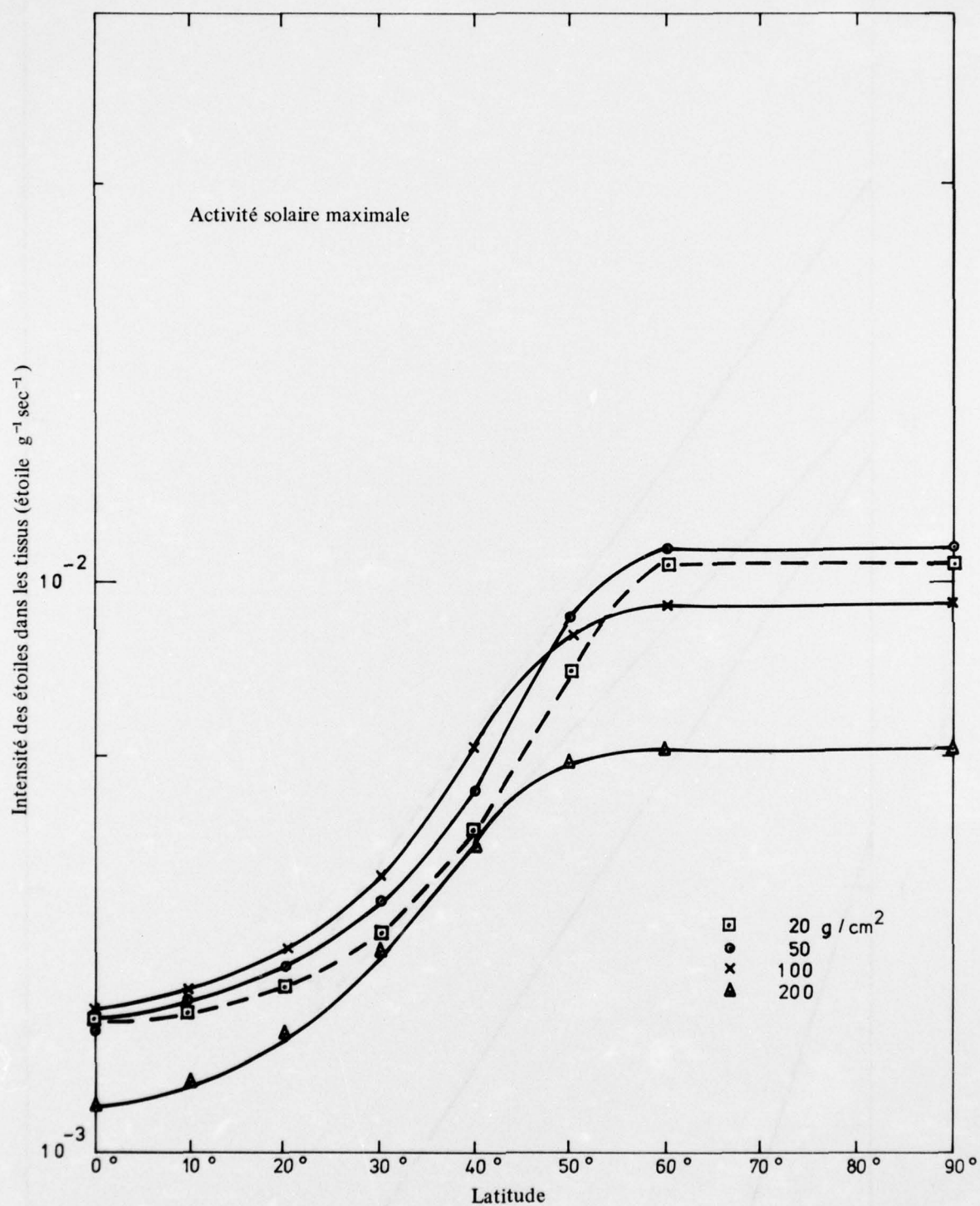


Fig.9 Variation de la fréquence des étoiles dans les tissus en fonction de la latitude (activité solaire maximale)

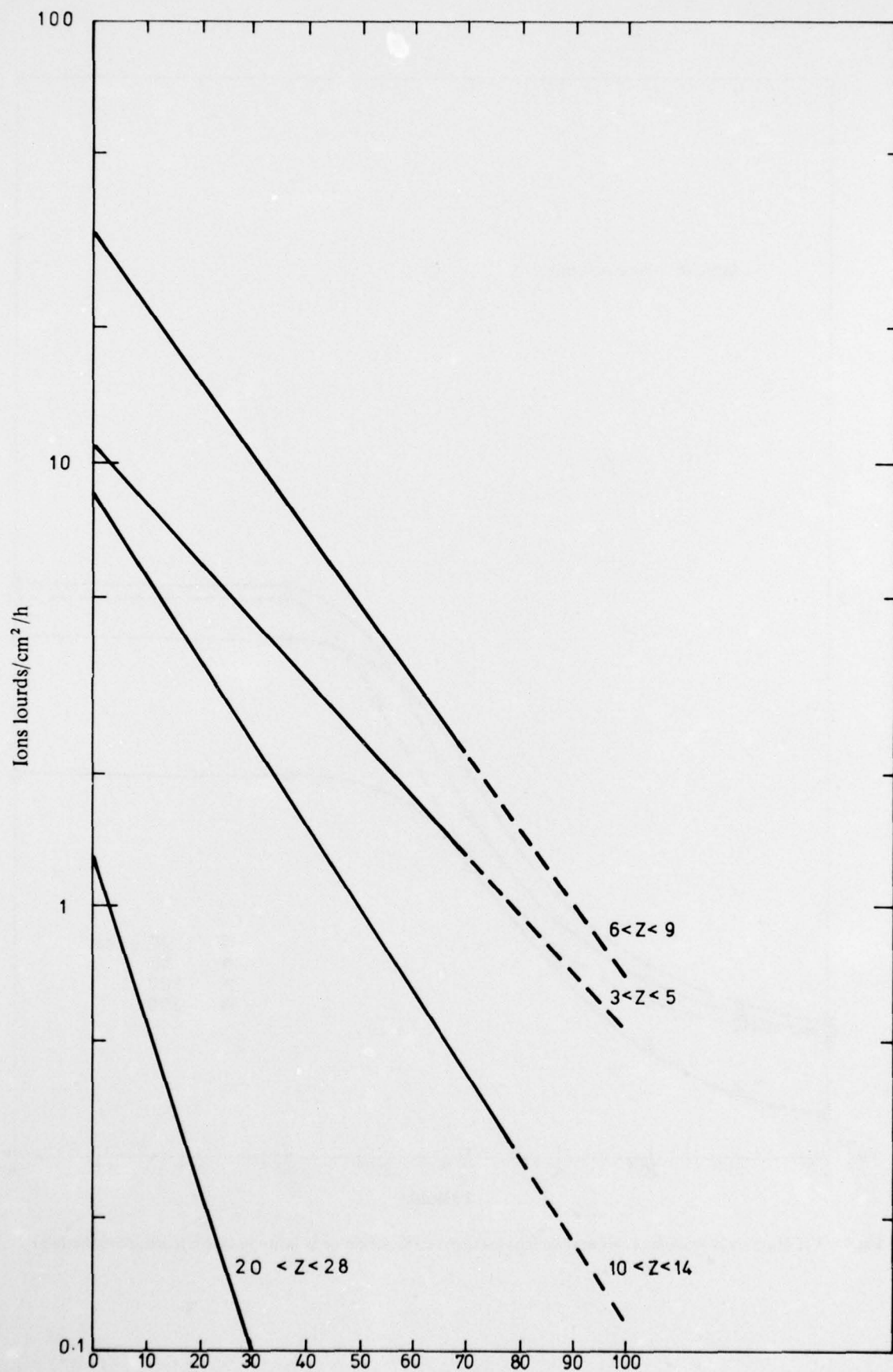


Fig.10 Variation du flux des ions lourds en fonction de la profondeur de l'atmosphère

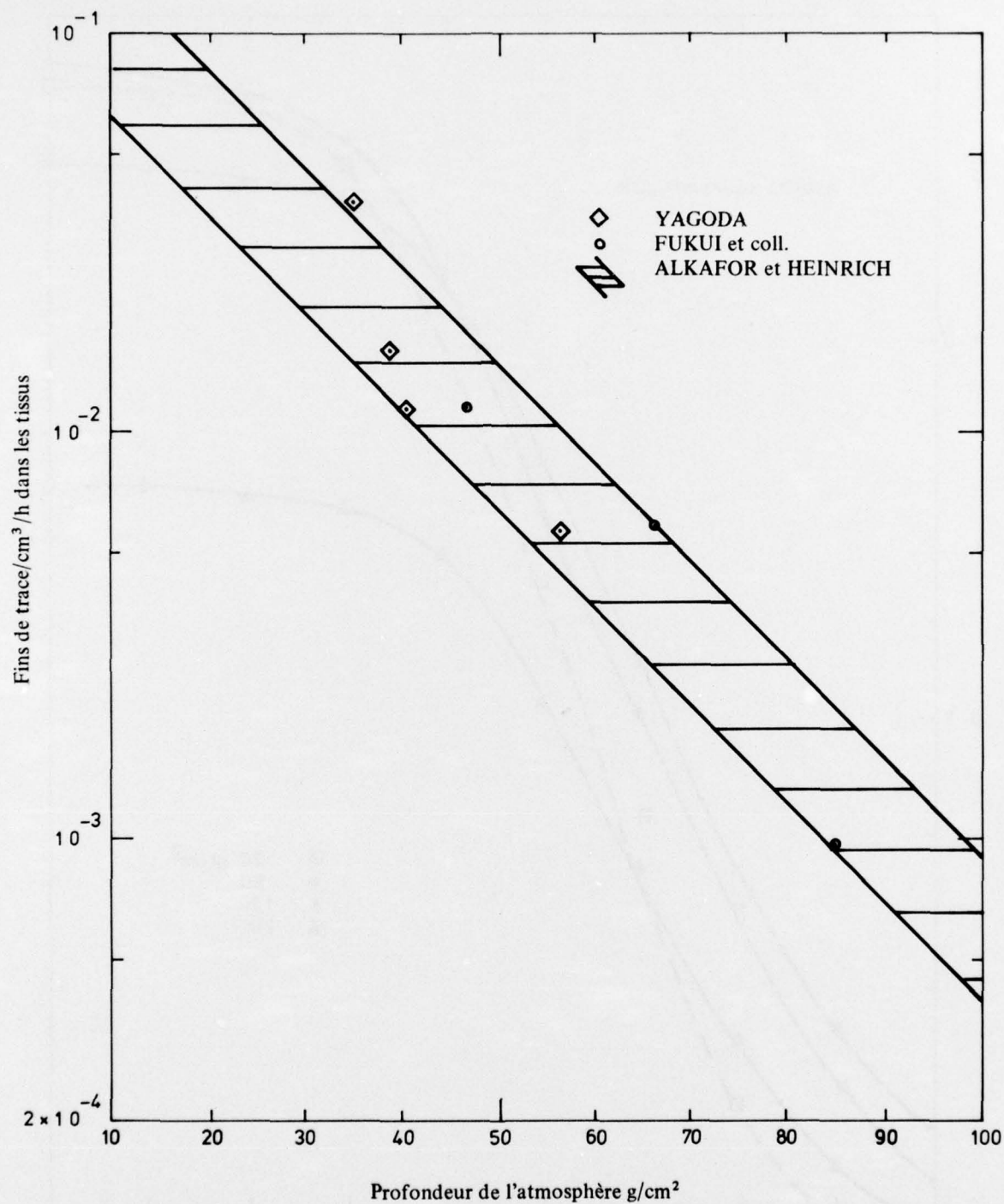


Fig.11 Variation de la fréquence des fins de trace des ions lourds dans les tissus en fonction de la profondeur atmosphérique

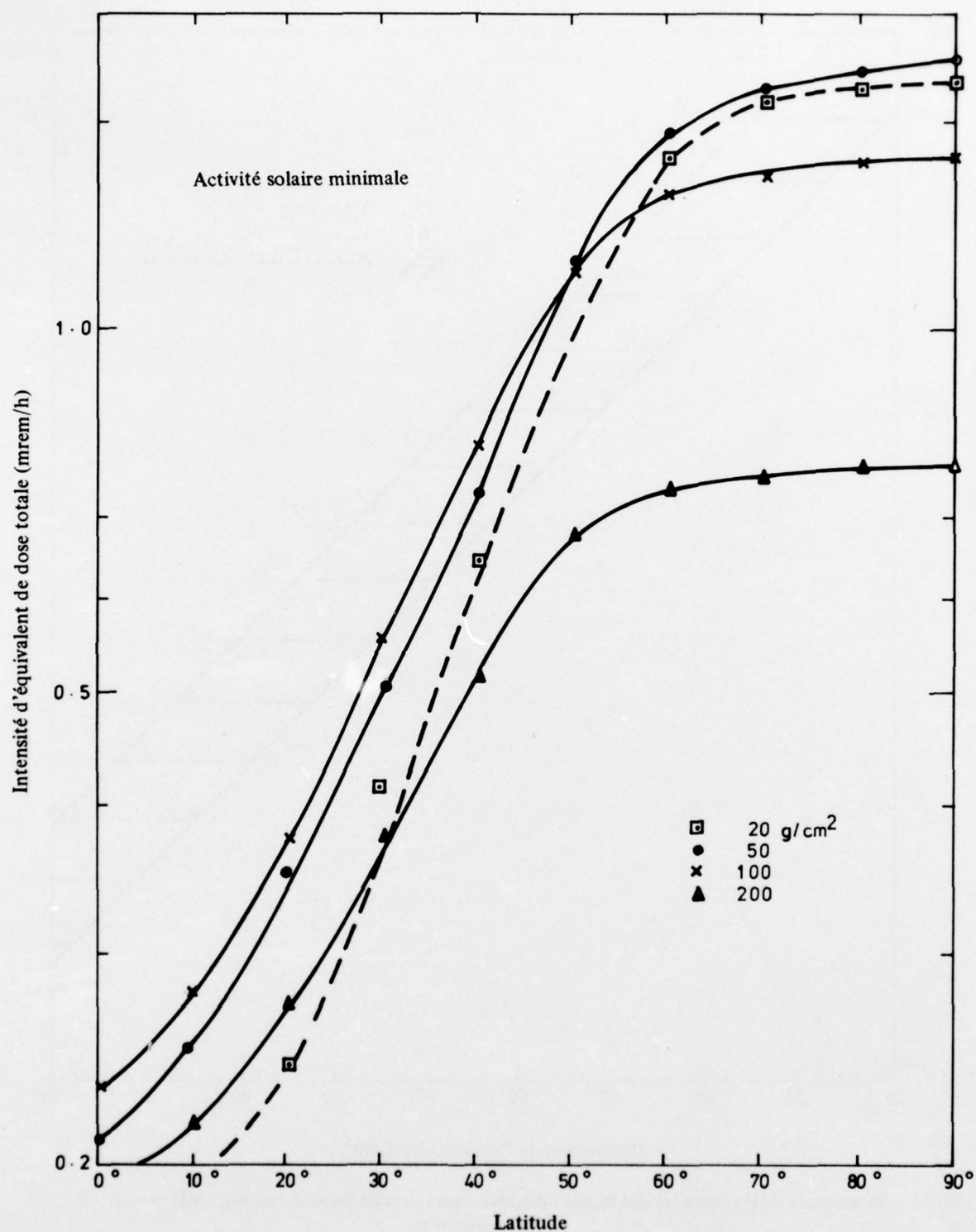


Fig.12 Variation de l'intensité totale d'équivalent de dose avec la latitude (activité solaire minimale)

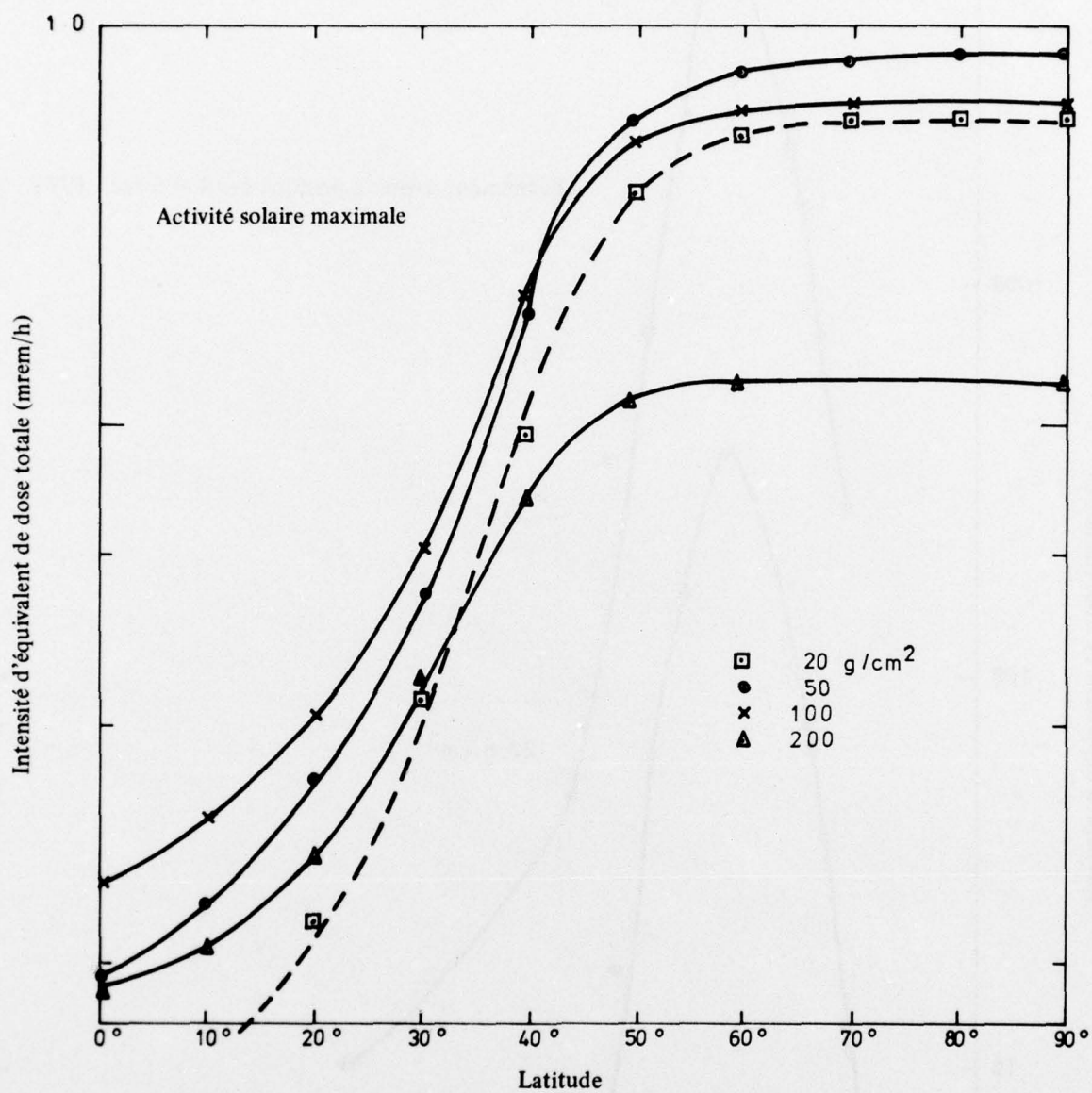


Fig.13 Variation de l'intensité totale d'équivalent de dose avec la latitude (activité solaire maximale)

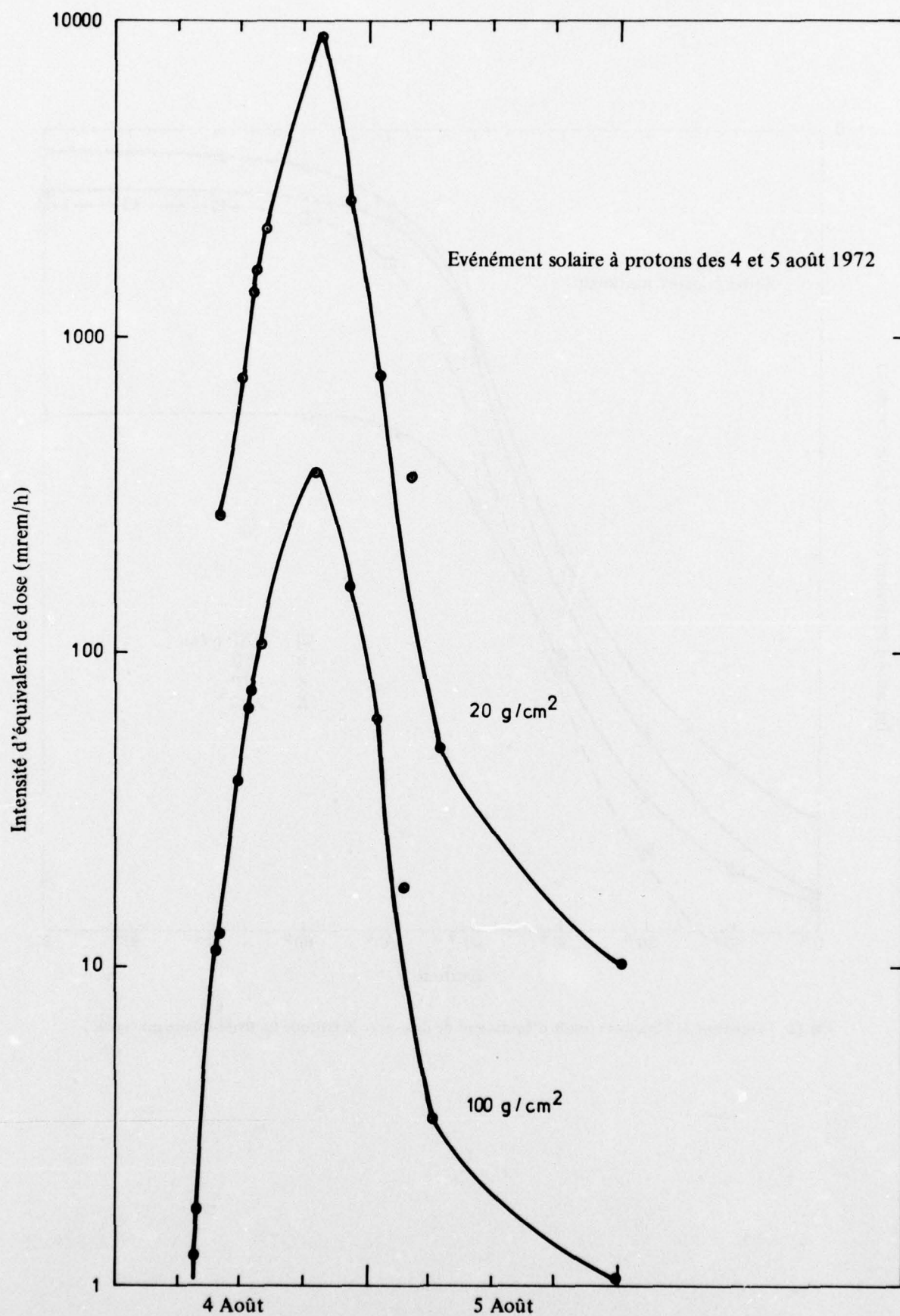


Fig.14 Variation de l'intensité d'équivalent de dose avec le temps à 20 et 100 g/cm²
Événement solaire à protons d'août 1972

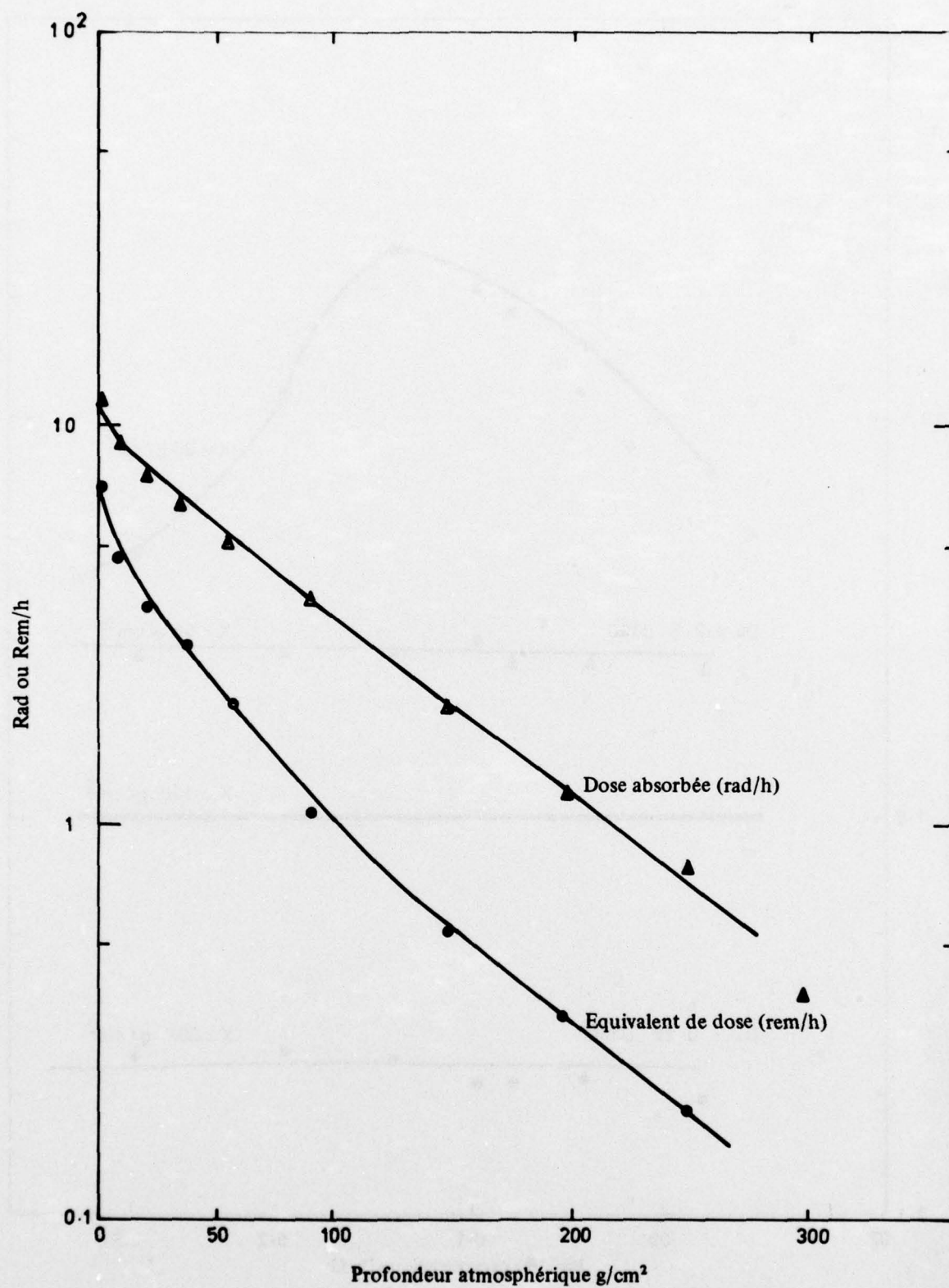


Fig.15 Variation de l'intensité maximale de dose avec la profondeur atmosphérique pour l'événement solaire à protons du 23/2/1956

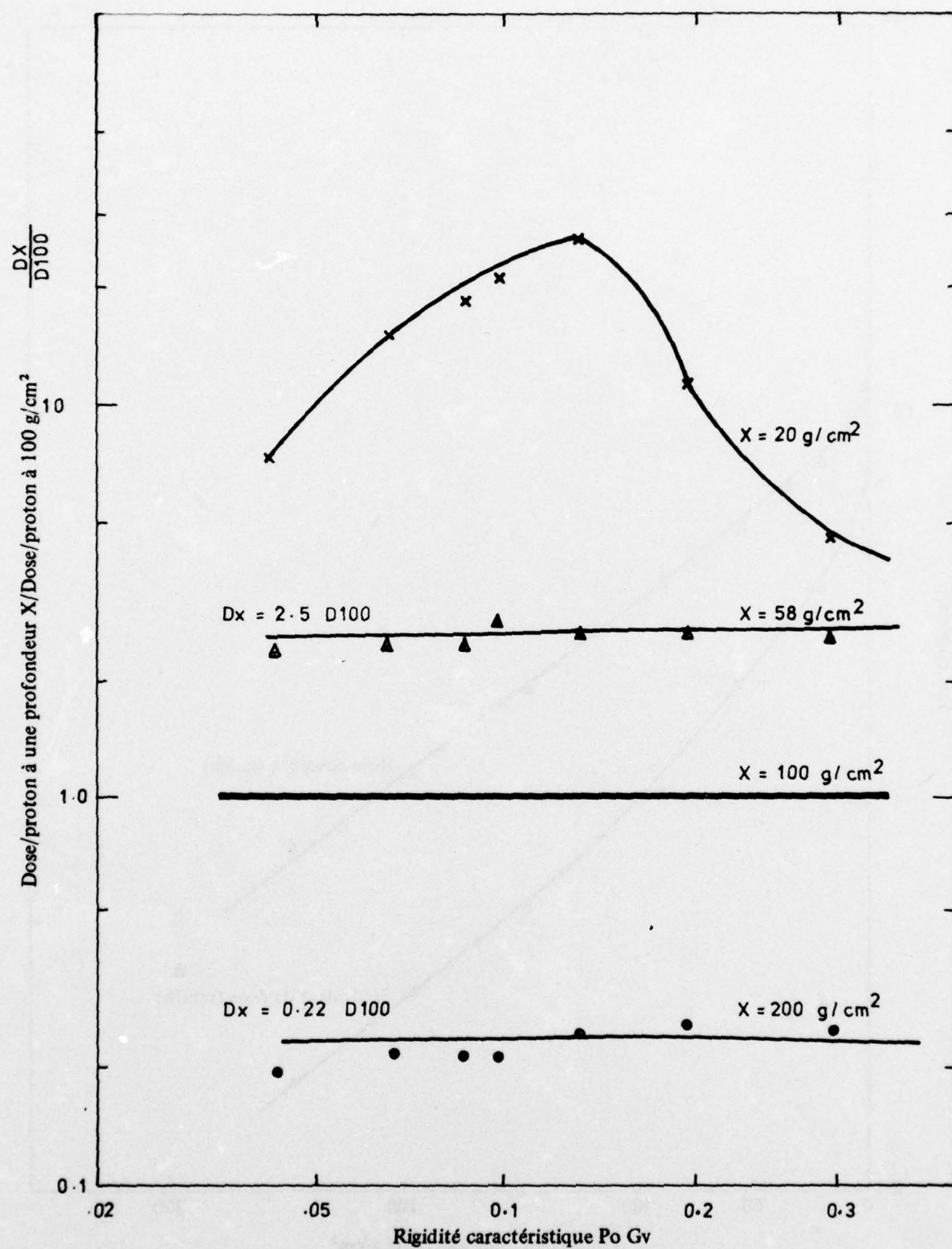


Fig.16 Variation de l'atténuation atmosphérique avec la rigidité caractéristique

ETUDES BIOLOGIQUES DES RAYONNEMENTS COSMIQUES

par

Col. R.P. Delahaye MC, FAF
Hôpital Bégin
94160 Saint Mandé

et

Prof. A. Pfister
C.H.U. Necker
156 rue de Vaugirard
75730 Paris Cedex 15

1. GENERALITES

1.1 Rappel de Radiobiologie

Pour étudier les rayonnements cosmiques au point de vue biologique, on peut se baser sur les données de la radiobiologie classique. Malheureusement, celles-ci s'appliquent mal aux radiations cosmiques. Il faut rappeler les interactions du rayonnement avec la matière.

1.1.1 Interaction Electronique

Une particule chargée ou un rayonnement électromagnétique peut provoquer:

- l'éjection d'un électron périphérique: c'est l'ionisation
- le déplacement d'un électron vers une couche périphérique: c'est l'excitation

1.1.2 Interaction Nucléaire

Les particules de haute énergie (p, n, alpha, ions lourds) créent:

- des collisions inélastiques: le noyau cible éclate en divers fragments (formation d'étoiles)
- des collisions élastiques: l'éjection des noyaux cibles engendre des trajectoires secondaires. Les électrons accélérés forment un cylindre d'ionisation autour des trajectoires des ions lourds (rayons delta). Les principales actions des radiations ionisantes sont des ionisations qui provoquent des ruptures secondaires ou primaires qui modifient les molécules rencontrées.

De plus, elles créent des radicaux libres qui entraînent des altérations physicochimiques de voisinage. Dans les cellules et les tissus apparaissent des radiolésions transitoires ou définitives suivant la gravité de l'atteinte et le pouvoir de régénération du tissu.

En ce qui concerne le rayonnement cosmique primaire qui comporte des particules lourdes de très grande énergie, il n'est pas impossible, mais non encore prouvé, que d'autres phénomènes se surajoutent: onde de choc mécanique caractérisée par la production de phonons, effets thermiques localisés à certaines structures cellulaires qui absorbent préférentiellement la chaleur (pigments mélaniques), effets photoniques sur les pigments rétiens.

1.2 Difficultés de l'Etude Biologique des Rayonnements Cosmiques

La simulation des effets du rayonnement cosmique peut être réalisée.

Au Berkeley Lawrence Laboratory, on parvient à accélérer des particules lourdes de classe L et M (voir tableau I) jusqu'à 2,1 GeV par nucléon. Ces particules sont les plus fréquemment rencontrées parmi les ions lourds. De cette manière on peut étudier les effets de fins de traces des ions lourds dans les tissus. On sait que les effets d'ionisation passent par un maximum dans cette région. Cette propriété pourrait peut-être être utilisée dans le traitement des tumeurs difficilement accessibles. Actuellement, on commence à pouvoir étudier les effets des ions de classe H (Néon et Argon).

Pour les références voir la page 35 du texte anglais

Les recherches entreprises dans l'espace à l'aide de satellites sont difficilement interprétables en raison de l'effet-paroi qui modifie le spectre du rayonnement cosmique et surtout des facteurs physiques du vol (vibrations, accélérations, apesanteur) qui peuvent avoir une action synergique ou antagoniste, avec les rayonnements ionisants.

L'utilisation de ballons stratosphériques permet d'éviter les facteurs dus au vol cosmique mais les expositions ne peuvent être que de durée limitée et le flux des particules y est trop faible.

TABLEAU I

Les Groupes des Ions Lourds

<i>Groupe</i>	<i>Echelle Z</i>	<i>Noyau atomique</i>
L (Light) léger	3 – 5	Li, Be, B
M (Medium) moyen	6 – 9	C, N, O, F
H (Heavy) lourd	10 – 19	Ne à K
VH (Very heavy) très lourd	20 – 28	Ca à Ni
SH (Super heavy) extrêmement lourd	> 28	

1.3 Moyens d'Etude

Le tableau II résume les différents moyens à la disposition des chercheurs.

1.4 Orientation des Recherches

Sur un organisme vivant, il existe des structures plus précieuses que d'autres:

- à l'échelon moléculaire, les acides nucléiques transmetteurs de l'hérédité, organisateurs de la spécificité et du métabolisme des cellules.
- à l'échelon cellulaire, certaines cellules très évoluées
 - les cellules nerveuses résistent beaucoup à l'atteinte des radiations ionisantes, car ces cellules ne se reproduisent pas. Cependant, les altérations qu'elles subissent sont fonctionnelles et peuvent être irréversibles.
 - les cellules souches et surtout les cellules jeunes des lignées germinales et hématopoïétiques, les cellules de revêtement des épithéliums digestifs qui se renouvellent très souvent.

2. LES EXPERIENCES TERRESTRES

2.1 Généralités

Elles doivent avoir lieu au niveau du sol et utiliser le rayonnement cosmique naturel avec ou sans protection. D'autres expériences peuvent être réalisées en sensibilisant au niveau du sol l'effet radiobiologique du rayonnement cosmique naturel. Ces travaux nécessitent des conditions constantes d'environnement (température, hygrométrie) pendant de longues périodes de temps car le rayonnement cosmique au sol ne distribue que des doses très faibles.

2.2 Expériences au Sol

2.2.1 Effets Biologiques du Rayonnement Cosmique Naturel

Les expériences réalisées sont toujours du même type: il s'agit de comparer des objets biologiques placés sous l'effet direct du rayonnement ou protégés de ce dernier par des écrans de roches ou de plomb.

Babcock et Collins (1929) (réf.27) placent des drosophiles dans un tunnel à 140 mètres de profondeur pour les soustraire à l'action du rayonnement cosmique galactique. Mais le fond de radiation (radioactivité naturelle des roches) est supérieur à celui régnant à la surface. Le taux des anomalies mutagènes observées chez les drosophiles placés dans le tunnel est supérieur à celui du lot témoin placé au niveau du sol. Le R.C.G. n'est donc pas le seul responsable de cette augmentation.

Engelstadt et Moxness (1934) (réf.27) maintiennent des souris dans un puits pendant une année. Ils n'observent aucune différence avec le lot vivant à la surface du sol.

TABLEAU II

<i>Lieu d'expériences</i>	<i>Etudes</i>	<i>Inconvénients et avantages</i>
Au sol	Etude de l'action du rayonnement cosmique secondaire sur des échantillons biologiques placés dans des conditions très différentes: – au niveau de la mer et en altitude – au niveau de la mer et sous terre – avec ou sans protection	Durée de l'expérience trop longue Intensités de dose insuffisantes
	Etude des noyaux lourds	L'accélérateur du Berkeley Lawrence Laboratory permet l'étude fondamentale des effets lésionnels des particules lourdes de classe L M et H pour des énergies allant jusqu'à 2,1 GeV/nucléon
Dans l'air	Ballon: Etude des noyaux lourds du rayonnement cosmique primaire	Expériences de durée brève (quelques heures) mais permettant une étude discriminative des noyaux lourds de haute énergie en évitant tous les paramètres physiques inhérents au vol spatial
	Fusées: Mesure des intensités de dose et exposition d'échantillons biologiques	Durée trop brève
	Satellites: Exposition de nombreux échantillons et mesures de nombreux paramètres	Durée prolongée des expériences. Possibilité d'emprunter les mêmes itinéraires que les vols humains. Inconvénient: paramètres associés du vol spatial

H.Planet, J.P.Soleilhavoup et Coll (1969) (réf.23) étudient des cultures de *Paramecia* (*Paramecia caudatum* et *Paramecia aurelia*) dans des enceintes radioperméables et dans deux enceintes aux parois de plomb épaisses de 10 centimètres. Des cultures sont placées dans une grotte à Moulis (Ardèche) sous 200 mètres de couvertures rocheuses. La radioprotection s'accompagne dans tous les cas d'une diminution du pouvoir de multiplication et d'un allongement du cycle cellulaire. Le rétablissement d'un niveau normal d'irradiation dans les chambres de protection s'accompagne inversement d'un retour à la normale de la croissance des populations protégées.

On trouve également un léger effet d'activation sous protection du plomb lorsque la manipulation a lieu sur un sol ayant une radioactivité naturelle importante.

Chez *Drosophila Melanogaster*, une diminution de l'intensité du R.C.G. entraîne un allongement du développement embryonnaire et larvaire. L'ensemble de ces faits démontre que les radiations ionisantes naturelles (ici, le rayonnement cosmique galactique ou le rayonnement tellurique) peuvent exercer un effet de stimulation sur certains organismes vivants.

2.2.2 Effets Biologiques du Rayonnement Cosmique Naturel Excité

Dans ces expériences, on accroît l'activité du rayonnement incident en interposant devant l'objet biologique de minces feuilles métalliques qui créent des étoiles et des cascades de particules.

Brajewski, Krebs et Zickler (1935) (réf.27) utilisent des écrans de plomb qui produisent des averse sous l'influence du R.C.G. Ils soumettent à cette irradiation des solutions de protéines, des champignons et des drosophiles. Après 4 à 6 semaines d'exposition, ils observent 3 fois plus de mutations que chez les témoins. Au microscope électronique, ils dénombrent jusqu'à 30.000 particules de protéines floculées tandis qu'il y en a 4 fois moins chez les témoins.

J.Eugster (1953) (12) montre que les oeufs de crevette (*Artemia Salina*) exposés aux rayons cosmiques à 3500 mètres ont un taux d'éclosion ramené de 80 à 4%.

Brown, Webb et Bennett (1958) (réf.27) observent une relation entre l'activité biologique de différents sujets et l'intensité du R.C.G. Les crabes-boxeurs incolores la nuit, sont de couleur sombre, brune ou cerise pendant le jour. Cette pigmentation indépendante de l'éclairage du milieu apparaît sous l'effet de phénomènes hormonaux. Elle disparaît la nuit, même si l'animal est éclairé artificiellement.

Brown constate qu'une irradiation par des cascades de particules empêche la coloration de se produire. Le RCG au niveau du sol agit sur les organes à sécrétion interne qui influence les changements de coloration.

Eugster (1963) (réf.13) montre le rôle favorisant des étoiles d'interaction particulaire sur le développement des carcinomes cutanés. Dans cette expérience qui se déroulait au sommet de la Jungfrau (3800 mètres), des lésions précancéreuses (dermatose arsenicale) étaient exposées au rayonnement sous une mince feuille d'or surmontée d'une plaque d'émulsion nucléaire. L'évolution carcinomateuse se faisait suivant des cordons d'accroissement situés dans l'axe de certaines branches des étoiles.

Toutes ces expériences confirment l'effet d'excitation des mécanismes biologiques déjà observé avec les rayonnements naturels. Elles montrent qu'une exagération de cet effet aboutit à des lésions (effet mutagène, effet fonctionnel indirect par action humorale secondaire à un trouble neuroendocrinien provoqué, développement tumoral). Mais comme le pense K.Buttner⁷, il n'est pas certain que les rayons cosmiques soient seuls en cause dans toutes ces expériences et à part l'expérience d'Eugster, l'extrapolation à l'homme est encore hasardeuse.

3. EXPERIENCES DANS LA HAUTE ATMOSPHERE

La composition du rayonnement cosmique qui arrive au niveau du sol est très différente de celle de la haute atmosphère ou de l'espace. Le rayonnement galactique primaire est caractérisé par la présence de particules de haute énergie. Il comporte environ 1% de noyaux lourds. Le rayonnement est transformé lorsqu'il traverse les parois métalliques des containers étanches transportant les objets expérimentés. Il apparaît des étoiles, des particules secondaires, des rayons gamma. L'effet d'activation observé au sol existe toujours mais il s'y ajoute l'effet destructeur direct de particules hautement énergétiques.

3.1 Expériences en Ballon

En 1934, G.G.Frizen (URSS)²⁷ place des drosophiles en dirigeable. Elles séjournent 2 heures à 15.900 mètres d'altitude. Il n'apparaît pas de faits significatifs. Ces faits sont confirmés aux USA par Briggs, Meier, Jollos et Rogers (1934-1936).

De 1951 à 1957, sous la direction de Bushnell²⁷ de nombreuses études radiobiologiques sont entreprises aux USA. Des ballons séjournent près de 24 heures à 30 km d'altitude. Les échantillons biologiques exposés sont variés: neurospores, drosophiles, graines végétales, oeufs et spermes de crevette, crabes, sauterelles, souris, cobayes, hamsters, singes inférieurs, cellules et cultures de tissus humains. En raison de l'imperfection des moyens assurant les conditions de vie en altitude, le retour et la récupération des sujets biologiques, de nombreux essais échouent. Aussi, les résultats sont-ils peu abondants et souvent discutables. Le comportement et les tests d'activité supérieure des singes, rats et souris observés longtemps après le vol (D.G.Simons et Steinmetz^{24,25,26} ne sont pas modifiés. L'étude histologique soigneuse des tissus de ces animaux et en particulier du système nerveux central ne révèle pas de différences avec les témoins (P.A.Campbell et Haymaker). Des modifications génétiques peu valables statistiquement sont rencontrées chez les neurospores, les oeufs et le sperme de sauterelle, les oeufs de crustacés et les cultures de tissus.

Lebish, Simons et Yadoga (1959) (réf.26) exposent 85 souris en ballons entre 24 et 32 km d'altitude. Ces animaux reçoivent près de 7.300 particules de $Z > 6$. Aucune modification notable n'est observée en ce qui concerne la durée de vie moyenne, l'état du système nerveux et de l'activité nerveuse supérieure, la fréquence d'apparition de tumeurs et de maladies diverses. Il n'y a pas de modification histologique des gonades.

D.G.Simons (1959) (réf.26) étudie l'effet du rayonnement cosmique sur le cristallin de jeunes souris blanches. Après l'exposition, les yeux sont examinés à la lampe à fente et par des méthodes microscopiques. Aucune lésion n'est décelée.

S.B.Pipkin et W.N.Sullivan (1959) (réf.22) exposent 10.761 drosophiles à 25 km pendant 16 heures. Aucune rupture, aucune modification génétique du chromosome X ne sont décelées.

J.Eugster d'une part et D.G.Simons d'autre part observent que les rayons cosmiques entraînent sur des graines d'orge l'apparition de mutation^{14,26}. Des formes naines ou monstrueuses apparaissent dans la descendance. Grâce aux émulsions nucléaires, Eugster s'assure que les mutations apparaissent uniquement sur les graines frappées par les particules du rayonnement cosmique. Les graines-témoins restées à terre et les graines expérimentées non touchées ne diffèrent pas de la normale. Le nombre d'épis et de graines diminue de 30 à 40% dans la descendance des graines touchées. Ces mutations s'observent jusqu'à la 4ème génération: certaines graines changent de couleur mais le nombre d'épis et de graines ne se modifie plus.

Des fragments de peau humaine et de lapin en survie sont exposés au rayonnement cosmique puis greffés après le vol. Il apparaît dans certains cas une tache pigmentée dont la couleur change les mois suivants. J.Eugster estime que cette tache est créée par l'impact d'une particule lourde.

H.B.Chase^{8,9} expose à l'altitude de 30 km, 185 souris et 5 cobayes au cours de 9 vols en ballon. Il remarque l'apparition de petites touffes de poils dépigmentés sur le pelage de souris C 57 Black dans les semaines qui suivent le vol.

D.G.Simons²⁶ reste plus de 30 heures dans un ballon à l'altitude de 32 km. A son retour, aucun effet nocif immédiat n'est isolé. Quelques semaines après, on remarque l'apparition des poils blancs sur le dos de la main, précisément à l'endroit où des particules très énergétiques du rayonnement cosmique ont été détectées par une émulsion nucléaire.

Ces deux derniers résultats sont à l'origine d'expériences de simulation au sol avec l'accélérateur linéaire d'ions lourds (HILAC) de Berkeley et avec des micro-faisceaux d'électrons de 20 à 200 microns de diamètre au Mount Vernon Hospital. Chase et Simons obtiennent confirmation de leurs expériences. Ils proposent le phénomène de blanchissement du poil comme un test fidèle de réaction de la peau aux ions lourds. Ils constatent que l'on est en présence d'un mécanisme radiobiologique particulier où l'irradiation n'a pas seulement un effet lésionnel direct mais également une action de voisinage et des conséquences locales et retardées.

De 1963 à 1967, le Centre d'Enseignement et de Recherches de Médecine Aéronautique de Paris (A.Pfister, G.Deitour et coll)^{2,3,20} entreprend une étude des ions lourds du rayonnement cosmique avec la collaboration du Centre de Recherches Nucléaires de Strasbourg (P.Cuer et R.Kaiser) sous l'égide du Centre National d'Etudes Spatiales. Ils retrouvent les résultats de Chase sur la souris C 57 et complètent ce travail par des méthodes histologiques et autohistoradiographiques. Dans les zones lésées, ils constatent des follicules pileux quiescents ou dégénérés, l'absence de mélanine, une déficience locale du métabolisme protéique et de la synthèse de mélanine. Un essai de corrélation entre zone lésée et passage de particules lourdes est réalisé avec un lapin noir dont une partie de la peau était couverte par une plaque d'émulsion nucléaire. Ces expériences confirment la responsabilité des ions lourds dans le déterminisme des dépigmentations et précisent le caractère de leur mode d'action. Il n'y a pas de destruction visible mais plutôt des effets fonctionnels cellulaires irréversibles portant sur certaines propriétés spécifiques (synthèse de mélanine, pouvoir de régénération de la gaine externe du bulbe pileux) et apparaissant à retardement. Enfin, on s'étonne de l'étendue importante de la lésion si l'on se réfère à la petitesse de la particule responsable.

A la même époque, Haymaker¹⁶ étudie une multitude de coupes histologiques de cerveaux de macaques qui ont séjourné 10 à 48 heures à 40.000 mètres. Il trouve des lésions dégénératives linéaires de la substance cérébrale. En l'absence de corrélations physiques valables, il ne peut malheureusement pas donner de conclusions à ce travail très important en incriminant de manière certaine les ions lourds du rayonnement cosmique. Il fait des expériences annexes en utilisant des microfaisceaux de protons et de deutérons qui lui montrent des lésions linéaires assez comparables à celles qu'il avait observées chez les singes exposés aux rayons cosmiques. Il constate que le seuil lésionnel exige des doses considérables hors de proportion avec celles qui sont délivrées dans les cylindres d'ionisation des ions lourds de classe L, M et H décrits par Schaefer. D'autres expériences de simulation sont exécutées par Curtis^{10,11}. Ce dernier imite une trajectoire d'ion lourd en concentrant des deutérons de 22 MeV produits par le cyclotron de Brookhaven. Il irradie par ce moyen des cerveaux et des yeux de souris. Il obtient des destructions de la substance cérébrale avec 14000 rads et un faisceau de 1 mm de diamètre mais pour avoir un effet avec un micro-faisceau de 25 microns il lui faut appliquer une dose de 400.000 rads! L'épithélium antérieur du cristallin n'est lésé et ne cause de cataracte qu'avec le faisceau de 1 mm. Il conclut de ses recherches que les ions lourds ne présentent pas de dangers significatifs pour le tissu cérébral et pour l'oeil: les lésions cellulaires sont individuelles, localisées à la trajectoire et n'augmentent pas de beaucoup le taux de mort naturelle des cellules nerveuses qui est, chez l'homme, de 10⁴ par jour. Il ajoute que les importantes lésions obtenues avec le faisceau de un millimètre sont dues à un effet indirect par altération des vaisseaux.

Ces conclusions sont très discutées en particulier par C.A.Tobias, à cause de la difficulté de nier l'existence de lésions localisées sur des cellules qui ne se reproduisent pas. Les ADN des cellules nerveuses peuvent être endommagés et créer des troubles qu'on ne sait pas encore diagnostiquer. A la limite, beaucoup de cellules nerveuses peuvent être tuées sans qu'on puisse le savoir. Pour certains auteurs, comme H.R.Mole le problème des effets des destructions éventuelles de cellules nerveuses par les radiations cosmiques, compte tenu de l'existence d'une destruction naturelle, doit être étudié pendant de nombreuses années. D'autre part, il semble bien que l'on ne puisse pas vraiment assimiler un faisceau de deutérons à une trajectoire d'ions lourds qui possède une couronne de radiations delta (Δ) et qui provoque tout au long de son trajet des interactions nucléaires (chocs inélastiques) dont les particules peuvent causer des altérations locales étendues. Les auteurs soviétiques admettent que les rayons delta peuvent avoir un rayon d'action de 3 à 4 centimètres.

Depuis 1971, le groupe de recherche de Biologie spatiale (GRBS) du CNES poursuit en France des recherches sur le rayonnement cosmique galactique à partir de la base de lancement d'Aire-sur-Adour. Ce groupe comporte plusieurs laboratoires:

- Le laboratoire de Biologie Médicale de l'Université Paul Sabatier de Toulon (directeur: H.Planel).
- Le C.E.R.M.A. (Médecin Général Gibert, Drs Nogues et Desprès)
- Le service de dosimétrie physique (G.Francois) du C.E.N. de Fontenay aux Roses.

- Le Laboratoire d'Histologie C.H.U. Necker (A.Pfister).
- Le Laboratoire de Physique corpusculaire du C.N.E. de Strasbourg (P.Cuer et R.Kaiser).
- Le Laboratoire de Biochimie et d'Enzymologie de l'Institut Gustave Roussy (Paoletti) à Villejuif.

2 types de recherches intéressant les organismes unicellulaires et la *Drosophila* sont entreprises concernant l'effet d'activation du rayonnement cosmique galactique¹.

L'espèce utilisée est *Paramecium aurelia* dont certaines souches sont radiosensibles et d'autres radiorésistantes. Quelle que soit la durée du vol en ballon (jusqu'à 11 heures) on observe un ralentissement de croissance 2 et 3 jours après l'exposition. Ce phénomène est suivi dans tous les cas d'une accélération de croissance toujours significative au 4^{ème} et 5^{ème} jour. Cet effet d'activation est d'autant plus important que la durée de plafonnement du ballon est plus longue. Afin d'éliminer toute variation de température qui aurait pu masquer l'effet d'activation par un léger refroidissement lors de l'ascension du ballon, un dispositif de thermo-régulation ($25^{\circ} \pm 0^{\circ} 1$) est mis en place. Les doses reçues mesurées à l'aide de détecteurs thermoluminescents atteignent 1,7 millirad pour un vol de durée de plafonnement de 6 heures environ. Les doses reçues par les cultures de contrôle laissées au sol pendant la durée de l'expérience, sont égales à 0,5 millirads.

Dix expériences avec *drosophila melanogaster* ont été réalisées avec 2831 oeufs pour les vols en ballon et un nombre identique d'oeufs témoins laissés au sol et placés dans les mêmes conditions d'environnement. Après les vols toutes les pontes ont été placées dans la même étuve. Les durées de développement embryonnaire et larvaire ont été précisées. Il a été démontré que l'exposition au R.C.G. primaire et secondaire s'accompagne d'un effet d'activation constant, significatif sur le développement embryonnaire et larvaire lorsque cette irradiation est réalisée sur des cellules germinales femelles adultes ou en voie de maturation.

L'étude sur l'influence éventuelle du rayonnement cosmique sur la durée de vie des *drosophiles* a eu lieu au cours de 4 vols en ballons. Il n'y a pas de modifications de la durée de vie moyenne dans les 2 sexes. Les auteurs estiment que ces faits s'expliquent par la durée relativement courte de l'irradiation par rapport à la durée totale de la vie de la *Drosophila*.

A.Pfister et C.Nogues¹ étudient les effets lésionnels des ions lourds sur l'encéphale du rat. 20 rats ont été soumis à des vols en ballon comportant une durée de plafonnement de l'ordre de 6 heures. Des plaques d'émulsion nucléaire Ilford K5 de 1 mm d'épaisseur x 10 mm x 21 mm sont au préalable insérées sous la peau du crâne. Quinze jours après le vol, les animaux sont sacrifiés par perfusion intravasculaire de liquide de Bodian. Les cerveaux sont coupés sagittalement en sections sériées de 5 microns d'épaisseur. Les trajectoires rectilignes de 19 particules lourdes (classes L et M) ont été extrapolées dans le tissu nerveux. 8 d'entre elles ont donné lieu à des constatations histologiques. Les lésions sont de 2 types:

- (1) Le plus souvent, la trace comporte le long de son trajet des neurones foncés disséminés avec quelquefois des images de satellitose ou de neuronophagie. On trouve parfois des zones plus étendues de neurones foncés situés peut-être à l'extrémité des trajectoires. Ce type d'altérations s'observe normalement lorsque le tissu nerveux a été fixé tardivement ou traumatisé avant fixation. Cet aspect peut néanmoins être considéré comme pathognomonique d'un trouble fonctionnel du neurone. Il existe dans l'hypoxie et dans l'intoxication au cyanure.
- (2) Une lésion différente a été rencontrée une seule fois. Elle siège sur le trajet d'un ion lourd de classe M qui pénètre dans le cervelet, allant de droite à gauche et légèrement vers l'arrière. Si l'on suit cette trajectoire, on trouve d'abord quelques cellules granuleuses foncées à noyau pycnotique puis un foyer oedémateux à population cellulaire diminuée, de forme conique et occupant environ 0,5 mm³, enfin une zone de dispersion étendue contenant de très nombreux neurones hyperchromatiques. Dans le foyer lésionnel on note la disparition de 30% des cellules granuleuses et des cellules de Purkinje, les vaisseaux sont congestifs et il y a de l'oedème. Les cellules de Purkinje ont souvent des aspects dégénératifs: chromatolyse, vacuolisation du cytoplasme, noyau irrégulier. La coloration de Bodian montre une raréfaction des neurites et des synapses ainsi qu'une altération de la substance blanche axiale. Il est curieux de ne pas constater de gliose ou de signes d'inflammation. Tout se passe comme si ce fragment de cervelet était déshabité de manière aléatoire.

Ces observations méritent une confirmation par des expériences d'exposition en accélérateur de particules lourdes.

En résumé, les nombreuses recherches en ballon ont révélé les faits suivants:

- effets d'activation pour les faibles doses homogènes,
- effets lésionnels cellulaires et tissulaires plutôt fonctionnels qu'organiques, étendus, irréversibles, individuels pour les particules de haute énergie et pour les étoiles (dépigmentation, altérations neuronales).

Ces études sont rendues difficiles par la faible intensité de dose du R.C.G. et par la durée brève des vols. Elles seront poursuivies en particulier pour l'étude des effets des ions lourds. Il est difficile actuellement de formuler des conclusions définitives.

3.2 Expériences en Fusée

Des fusées contenant des spores de champignons, des drosophiles, des souris, des singes ont été lancées aux USA en 1946, 1947, 1950 et 1952 atteignant une altitude de 100 km. Des conclusions précises n'ont pu être élaborées, la plupart des animaux ayant péri.

Par la suite, ces expériences ont été reprises de 1958 à 1960 aux USA. Grâce aux fusées balistiques, l'altitude de 500 km est actuellement atteinte de façon courante pour des vols durant en moyenne 1/4 d'heure. Les animaux récupérés ont gardé leur comportement normal. Mais la durée d'exposition est bien trop brève pour juger de l'action biologique des rayonnements cosmiques. Les renseignements intéressants la radiobiologie sont pratiquement inexistantes.

3.3 Expériences en Satellites

3.3.1 Etudes Soviétiques^{15,17,18}

Les soviétiques étudient surtout les effets globaux des vols cosmiques et essaient ensuite d'individualiser l'action des différents facteurs du vol en comparant les résultats observés avec ceux des témoins restés au sol. Les américains réalisent des expériences plus orientées, utilisant les ballons, les satellites et des corrélations physiques.

Les essais ont porté sur diverses manifestations de la vie depuis les molécules d'A.D.N. jusqu'à l'homme:

- Modifications physico-chimiques et immunologiques de suspensions d'ADN: pas de résultats.
- Inactivation de virus, bactériophages.
- Apparition de mutations auxotrophes de bactéries (résultats contradictoires, jamais significatifs).
- Modifications de survie, d'index mitotique.
- Anomalies mitotiques des cellules Hela, Krebs ou Ehrlich (résultats non significatifs).
- Induction de bactéries lysogènes. En principe, c'est un test excellent car il est sensible à 200 mrad. Il n'a pas été observé de résultats probants, car il n'y a pas de corrélation physique:
- Exposition de levures, d'algues (*Chlorella*), de spores de champignons (résultats non probants).
- Sur les végétaux, les soviétiques ont réalisé plusieurs expériences dont les résultats ne sont pas facilement exploitables. En effet, dans la discussion, on ne fait pas la part de ce qui revient aux rayons cosmiques, à l'apesanteur, aux vibrations. On peut simplement retirer l'impression que les plantes issues de graines exposées ont une croissance plus vigoureuse. On relève des anomalies mitotiques dans le développement des racelles:
 - ponts chromosomiques
 - rupture de chromosomes par non-disjonction au moment de la mitose (phénomène peut-être lié aux vibrations).
- Sur les insectes: les différentes expériences emploient des drosophiles et des charançons sous forme d'oeufs, de larve, de puppe, ou même d'adultes. Les résultats sont très contradictoires et les auteurs ne peuvent donner une conclusion de synthèse. Les drosophiles sont difficiles à utiliser dans de telles expériences car elles sont sensibles à de très faibles variations de température ainsi qu'aux vibrations.
- Sur les êtres supérieurs: ces expériences, malgré les progrès de l'astronautique, fournissent peu de renseignements sur les effets du rayonnement cosmique. Le premier sujet biologique transporté par un satellite est la chienne Laïka (1957). Pendant le vol qui dure 7 jours aucune influence du rayonnement cosmique n'est décelée, mais l'animal n'est pas récupéré.

Les chiennes Belka et Strelka, examinées immédiatement après le vol, et longtemps après, restent strictement normales. D'autres vols américains et russes étudient des chiens, des rats, des souris, des cobayes. Les résultats des investigations cliniques et biologiques n'ont pas apporté d'informations importantes. On a étudié, en particulier au cours des vols sur Vostok II, l'action génétique des rayonnements cosmiques. Certains faits parurent intéressants:

- fréquence des aberrations chromosomiques de la moelle osseuse et de la rate chez les souris embarquées,
- faible augmentation de la fréquence des mutations léthales dominantes et récessives liées au sexe.

Sur deux souches de *Drosophile* malheureusement, les auteurs soviétiques retrouvent les mêmes faits en soumettant les échantillons biologiques aux vibrations.

3.3.2 Etudes Européennes

Les Européens (français et allemands) sous l'égide du Groupe de Travail de Biophysique Spatiale du Conseil de l'Europe participent aux expérimentations biologiques réalisées à bord des vaisseaux Apollo.

Au cours des vols Apollo 16 et 17, l'expérience Biostack¹⁵ a eu pour but d'étudier les effets individuels des ions lourds du rayonnement cosmique primaire sur des objets biologiques en état de vie latente. T.H.Planel,

J.P.Soleilhavoup, P.Cuer, R.Kaiser, P.Massue, H.Francois, G.Portal (France), E.Bucker, E.H.Graul, G.Horneck et Coll (R.F.A.) utilisent la technique des empilements qui consiste à interposer des objets biologique en couches minces avec des détecteurs de particules, émulsions nucléaires ou plastiques.

Parmi les objets biologiques il y avait:

- des spores de *Bacillus Subtilis*;
- des graines d'*Arabidopsis thaliana*;
- des oeufs de crevette (*Artemia salina*).

Le rôle lésionnel des ions lourds dans l'expérience de H.Planet est démontré. Il existe une diminution très significative du taux d'émergence des larves d'*Artemia* qui ont été traversées par des particules lourdes par rapport aux témoins. Il importe toutefois de préciser ce qui revient au rayonnement cosmique et aux autres facteurs du vol (vibrations, accélération, apesanteur) car les oeufs non touchés par les particules lourdes ont également, dans une moindre mesure, un taux d'émergence plus faible que celui des témoins.

3.3.3 Etudes Américaines

Le Professeur Tobias et son équipe de Berkeley se sont attachés à expliquer par des expériences au sol certains troubles visuels observés par les cosmonautes américains^{5,19,28}. Au cours des missions spatiales, l'homme perçoit, à raison d'une à deux fois par minute, des sensations d'éclair, de taches ou de traces lumineuses que l'oeil soit adapté ou non à l'obscurité. Ces sensations peuvent être reproduites en exposant l'oeil à des faisceaux de neutrons de faible ou de forte énergie ou encore à des particules alpha de 250 MeV. Tobias pense que ces phénomènes sont causés par des particules chargées induites par l'irradiation. Ces dernières excitent directement les zones réceptrices de la rétine par ionisation, par excitation électronique ou peut-être par une production locale de photons. La fréquence d'apparition des sensations lumineuses correspond assez bien au flux d'ions lourds de $Z \geq 6$ reçus par la rétine.

R.J.Beckman, C.H.Bonney, et D.M.Hunter⁴ utilisent des flux de $0.8/250$ Mev/nucléon variant de $1,3 \times 10^7$ particules/cm² (dose de 171 rads) à $5,9 \times 10^8$ particules/cm² (dose de 7540 rads). Des photographies des fonds d'oeil des singes rhésus sont pratiquées avant et après exposition (24h, 48h, 1 semaine, 5 semaines). Avec les doses les plus faibles, on observe des hémorragies punctiformes de la rétine. Avec des flux importants, il apparaît une rétinopathie aiguë (nécrose ischémique). L'expérimentation montre que si les hémorragies régressent avec le temps, il n'en est pas de même pour la nécrose qui est définitive. Un seul ion lourd paraît capable d'induire une hémorragie punctiforme de la rétine. Plusieurs hypothèses du mode d'action des ions lourds sur le tissu nerveux ont été émises:

- rupture des lysosomes intracellulaires et évacuation d'hydrolases dans la cellule.
- destruction des cellules d'accompagnement vasculaire (appareil gliovasculaire).
- destruction directe des structures neuronales.

Haymaker et coll¹⁷ ont embarqué des souris (*Perognathus longimembris*) dans les vols Apollo 16 et 17. Ils ont observé de petites altérations des téguments du sommet du crâne en rapport avec des traces de particules lourdes de classe M ou H. Il s'agit de petites zones nécrotiques de l'épiderme ou de la gaine des poils, accompagnées d'une petite réaction inflammatoire localisée du derme. Dans d'autres régions, ils ont pu observer de petites altérations dégénératives des muscles peauciers. L'étude histologique de l'encéphale de ces animaux n'a pas été publiée.

4. CONCLUSIONS

Les diverses expérimentations réalisées à ce jour ont fait progresser la connaissance du rôle biologique du rayonnement cosmique. Il reste cependant à résoudre bien des problèmes, en particulier le moyen de mesurer le risque radiobiologique qu'il entraîne.

On a d'abord mis en évidence avec certitude un effet d'activation des mécanismes biologiques qui peut être considéré comme bénéfique. Il est le propre du rayonnement cosmique qui parvient naturellement sur la Terre. Si ce dernier est modifié par la traversée de protections métalliques, il peut créer des mutations somatiques et un accroissement anormal du développement des cellules. Dans les deux cas, le rayonnement cosmique galactique peut être assimilé à un rayonnement homogène dont les doses d'irradiation sont mesurables en rads par les procédés classiques.

A haute altitude et surtout dans l'espace, le rayonnement cosmique peut être considéré, d'un point de vue radiobiologique, comme composé de deux types d'éléments:

- la plus grande partie est formée de particules simples et de rayonnements électromagnétiques dont l'ensemble forme une ambiance homogène mesurable en rad.
- une faible partie (1%) est constituée par des particules lourdes de très forte énergie dont l'effet est plus difficile à analyser et à mesurer.

Les effets biologiques des ions lourds et des étoiles sont complexes. Les lésions qui apparaissent sont spécifiques du tissu traversé, de la charge de la particule et de sa vitesse. Chaque particule a une action individuelle qui varie suivant le point de la trajectoire considéré et suivant la distance radiale à l'axe de la trace. L'effet lésionnel est intense au coeur de cette dernière puis décroît rapidement. Il est maximum près de la fin de trace (pic de Bragg). En plus, il faut considérer toutes les interactions nucléaires qui jalonnent le parcours de la particule et qui provoquent des altérations localisées au niveau des étoiles formées. Ce rayonnement non homogène échappe aux méthodes de mesure appliquées en radiobiologie classique car la dose réelle reçue à proximité du trajet de la particule est énorme par rapport à la dose ramenée au gramme de matière traversée. Par exemple, il faut utiliser une irradiation de 300.000 rads avec des rayons X pour obtenir l'arrêt d'émergence d'un oeuf d'*Artemia salina*. Mesurée avec des méthodes classiques, la dose provoquant le même effet est de l'ordre de quelques millirads dans les vols Apollo et de 650 millirads avec des ions d'oxygène ou de carbone de 250 MeV/nucléon à l'accélérateur de Berkeley. On retrouve les mêmes contradictions dans les études portant sur le tissu cérébral et la rétine. Ce risque particulier dû aux ions lourds n'est pas un problème préoccupant pour les vols à des altitudes inférieures à 25.000 mètres mais pourrait l'être pour des missions spatiales de longue durée.

BIBLIOGRAPHIE LIMITEE

Il n'était possible de réunir dans le cadre de ce rapport une bibliographie exhaustive. Nous avons fait un choix des références complétant le travail de synthèse présenté ci-dessus (voir la page 35 du texte anglais).

PRECEDING PAGE BLANK NOT FILMED

PROBLEMES RADIOBIOLOGIQUES POSES PAR LES VOLS A HAUTE ALTITUDE (INFERIEURE A 25 km)

par

Col. R.P. Delahaye, MC, FAF
Hôpital Bégin
94160 St Mandé, France

et

Group Capt. Sturrock, MC, RAF
RAF Institute of Aviation Medicine
Farnborough, Hants, UK

1. INTRODUCTION

Si l'on excepte les intercepteurs, les avions de transport et certains vols de reconnaissance, toutes les opérations militaires se conduisent à basse altitude. Cependant, il faut insister sur la possibilité de développement de techniques offensives et défensives à haute altitude, du fait de la vulnérabilité des avions à basse altitude (importance du rôle joué par les fusées dans la dernière guerre israélo-arabe). La mise en service des T.S.S. (Concorde en particulier) a permis un inventaire de la tranche d'altitude comprise entre 15 et 20 km. Les renseignements obtenus facilitent une discussion des faits radiobiologiques des altitudes inférieures à 25 km.

Le Personnel navigant sera soumis à une irradiation mixte:

- faibles doses de rayonnement cosmique galactique,
- hautes doses des événements solaires,
- exposition aux ions lourds.

2. RAYONNEMENT COSMIQUE GALACTIQUE ET P.N.

Pour des altitudes inférieures à 25 km, le P.N. recevra une irradiation due au rayonnement cosmique galactique inférieure à 1,5 rem par an, compte tenu du nombre d'heures de vol passées en haute altitude (supérieure à 15 km). Il s'agit de doses très faibles.

Les faibles doses de radiation sont considérées comme des doses ne dépassant pas celles visées par les recommandations de l'International Commission of Radiological Protection (I.C.R.P.)^{1,3}.

Les faibles doses, pour l'I.C.R.P. sont celles qui devraient produire des effets ne pouvant être décelés que par des méthodes statistiques appliquées aux groupes importants.

Le moyen le plus pratique d'analyser les effets liés aux petites doses de radiations ionisantes consiste à affirmer a priori, que l'effet par unité de dose est le même que celui des doses élevées. Pour ces dernières, les données peuvent être analysées statistiquement. La plupart des approches de cet ordre permettent de définir la limite supérieure des risques liés aux radiations ionisantes. En effet, il n'est guère vraisemblable que les petites doses puissent créer des risques plus élevés par dose/unité que les fortes doses.

Nous étudierons successivement:

- les risques d'une radiocarcinogénèse,
- le problème du raccourcissement de la durée de la vie par les radiations ionisantes.

2.1 Les Risques d'une Radiocarcinogénèse^{2,3,9,17}

Les radiations ionisantes sont capables d'induire des cancers. Il faut remarquer que l'étiologie des cancers est complexe et que de nombreux facteurs inconnus interviennent probablement dans leur formation.

L'importance de facteurs tels que l'état hormonal et la présence d'un état morbide pré-existant (lésion pré-cancéreuse) a renforcé la crédibilité de la théorie de la carcinogénèse selon laquelle on se trouve en présence d'un Initiateur et d'un Promoteur. Sous réserve de l'exception possible constituée pour le cas particulier de l'exposition prénatale suivie de l'apparition d'une tumeur chez l'enfant, le cancer est lié à des doses d'environ 100 rads avec exposition d'une grande partie du corps ou avec une irradiation de nombreux tissus particulièrement sensibles. Cependant, dans ces circonstances, l'apparition d'un radiocancer n'est pas du tout certaine. Tout semble indiquer que si les radiations ionisantes peuvent être l'agent "initiateur" l'intervention d'un ou plusieurs promoteurs serait également nécessaire pour que la tumeur se manifeste.

2.1.1 Leucémogénèse^{2,3,9,17}

L'exemple classique des relations semblant exister entre l'apparition de la leucémie et l'exposition antérieure aux radiations ionisantes est dû aux travaux de W.M.Court-Brown et R.Doll⁶. Parmi les 13 352 malades dont la spondylite ankylosante a été traitée par radiothérapie localisée entre 1935 et 1954, 36 cas de leucémies ont été décelés.

Par rapport à la population de référence, ce taux de leucoses est 10 fois plus élevé. La leucémie paraît due à des doses variant entre 100 et 3000 R (à la moelle osseuse des vertèbres). Tous ces malades ont été traités par irradiations localisées selon des modalités extrêmement variables (dose, débit de dose et distribution de dose). Toutefois, il n'est pas exclu que ce taux de morbidité puisse être lié à une prédisposition plus marquée de ces populations à la leucose. Il est également possible que certains traitements médicaux aient pu favoriser la leucémogénèse.

En écartant pour le moment ces éventualités, il faut rappeler que le risque de radioleucémie induite par des doses d'exposition variant de 300 à 1500 R à la moelle rachidienne des sujets de sexe masculin a été évalué à 1 ou 2 cas par million de sujets exposés par année, pour une exposition d'1 R en moyenne pendant 7 ans.

L'étude des survivants des explosions nucléaires d'Hiroshima et de Nagasaki (1945) affirme le rôle des radiations dans la leucémogénèse. A.B.Brill et collaborateurs⁵ fixent les risques de leucémie chez les japonais exposés à des doses comprises entre 100 et 500 rads, malgré des différences évidentes existant dans les conditions d'exposition:

- répartition gamma/neutron,
- intensité de dose,
- distribution de la dose dans le temps comme dans l'espace.

Des recherches sur l'incidence de la leucémie chez les enfants (Stewart^{14,15}) dont la mère a été examinée par des radiographies pratiquées lors de la gestation montrent qu'il existe des relations entre ces expositions et la leucémie. Mais d'autres facteurs semblent intervenir: l'âge de la mère, la présence d'infections pulmonaires^{14,15}. Bien que Court-Brown et Doll pensent que les données actuelles ne permettent pas de dégager d'une manière certaine l'incidence de la leucémie chez les enfants dont la mère a été exposée aux radiations ionisantes, on admet que l'effet leucémogène par rad de radiation est 10 fois plus élevé chez le fœtus que chez l'adulte. On pense que la leucémie pourrait être provoquée par des doses de quelques rads lors d'exams de radiodiagnostic.

L'estimation couramment acceptée du risque de radioleucémogénèse est de 15 à 40 cas par rad par 10⁶ personnes pour des doses variant entre 60 et 400 rads. Le maximum de fréquence des leucoses radio-induites se situe entre 8 et 10 ans après l'exposition. Puis, l'incidence de la leucémie baisse pour atteindre des valeurs normales 25 ans après l'exposition.

J.B.Storer et V.P.Bond¹⁶ observent qu'il n'y a pas de concordance entre les résultats de l'expérimentation animale et les données tirées de l'observation des populations humaines, en ce qui concerne les tumeurs provoquées pendant la vie utérine. Il semble que, pendant leur vie prénatale, les souris soient réfractaires à la formation de tumeurs provoquées. Il n'existe pas de bon modèle animal pouvant contribuer aux études rétrospectives liées aux examens radiologiques du bassin pour les enfants pendant leur existence prénatale. Pour beaucoup d'auteurs, toute estimation chiffrée du risque prête à discussion.

2.1.2 Autres Affections Malignes

Il est apparu plus facile d'étudier les rapports existant entre l'exposition aux radiations ionisantes et l'accroissement de l'incidence du cancer.

Les mêmes recherches entreprises chez des malades atteints de spondylite ankylosante traitée par radiothérapie localisée, chez des enfants exposés in utero (examens de radiodiagnostic) démontrent l'accroissement du taux de toutes les formes de tumeurs malignes induites par les radiations ionisantes d'origine externe.

Bien qu'il soit très difficile d'évaluer ces observations, l'I.C.R.P. estime que les tumeurs cancéreuses non leucémiques sont liées incontestablement à des doses atteignant plusieurs centaines de rads.

En dépit de toutes les difficultés, des estimations du risque d'apparition du cancer du poumon, de la thyroïde et du sein ont été élaborées.

Pour le *cancer du poumon*, le risque estimé est de 10 à 40 cas par rad et par million de personnes exposées à des doses variant de 25 à 300 rads, dans les 25 ans qui suivent l'exposition.

Pour le *cancer de la thyroïde*, le risque estimé est de 40 cas par million et par rad.

Pour le *cancer du sein*, il est de 6 à 20 cas par 10^6 personnes et par rad.

Pour la thyroïde et le sein, ces estimations sont valables pour des doses variant de 60 à 400 rads et pour les 25 ans qui suivent l'exposition.

L'I.C.R.P. remarque dans ces supputations que l'accroissement total de la mortalité dû à ces tumeurs pendant 20 ans, à la suite d'expositions totales du corps, représenterait probablement le double des cas mortels par leucémie radio-induite.

C'est l'origine du risque total estimé à environ 40 cas de tumeurs malignes par million de personnes par an et par rad¹⁷. Il faut considérer avec prudence l'importance de ce risque aux faibles doses. On admet habituellement que le risque de cancer par unité de dose est le même que celui observé à des doses supérieures. Il existerait un rapport linéaire entre réponse et dose.

Remarquons que cette hypothèse surestime le risque à des doses inférieures à celles auxquelles les observations sont faites. Le degré de surestimation augmente éventuellement en fonction de la diminution de la dose¹⁹.

Il faut ajouter quelques données intéressantes:

- il s'agit de doses de plusieurs dizaines ou centaines de rads,
- les hauts débits de dose (intensité de dose) sont plus carcinogénétiques que les bas débits de dose,
- les maladies pré-existantes sont un facteur favorable à l'apparition du cancer,
- l'estimation de 40 cas pour un million de personnes et par rad est peut-être trop importante.

2.2 Réduction de la Longévité

Les radiations ionisantes sont susceptibles d'entraîner dans certaines conditions, une réduction de la longévité. Ce problème nous paraît particulièrement important à évoquer car il a soulevé des passions et surtout des inquiétudes parmi le personnel navigant. Certains radiobiologistes n'ont-ils pas prétendu lors d'une réunion scientifique du F.A.U.S.S.T. (Franco-Anglo-US Supersonic Transport) qu'une heure de vol à plus de 15 km d'altitude réduirait l'espérance de vie de 20 jours.

2.2.1 Chez l'Animal

Expérimentalement, chez les mammifères, le raccourcissement de la durée de la vie est observée. On compare des animaux irradiés (souris, rats) à un lot d'animaux témoins non irradiés. On note dans les deux groupes, l'existence des mêmes affections à des taux différents. L'irradiation en général accroît le nombre et la gravité des affections habituelles. Préciser jusqu'à quel point les processus de raccourcissement de la vie par l'irradiation sont fondamentalement identiques à ceux provoquant un vieillissement précoce n'est pas possible actuellement. A dose unique, chez les rongeurs, on observe un raccourcissement de la durée de la vie de 2 à 4% pour 100 rads délivrés. Les souris femelles sont plus sensibles que les souris mâles.

A doses multiples et fractionnées: les petits animaux de laboratoire irradiés à doses faibles pendant plusieurs jours présentent un raccourcissement de la durée de vie de l'ordre de 11% pour 1000 rads.

A.C.Upton et coll¹⁸ ont irradié 15000 souris de race fixée dans des conditions d'isolement pour éviter les interactions éventuelles entre radiations ionisantes et bactéries pathogènes. Le lot témoin comprend 4000 souris. 3000 sont exposées à 10 rads (rayonnements gamma) à l'âge de 10 semaines. L'analyse préliminaire montre que la longévité des souris mâles se prolonge de 4 jours et celle des souris femelles se réduit de 8 jours. En faisant varier les débits de dose de 4 rads/jour à 80 rads/min on ne peut formuler de règle précise sur l'influence respective de ces intensités de dose. De plus, il faut tenir compte de la baisse de la radiosensibilité en fonction de l'âge.

Chez les chiens, A.C.Andersen et L.S.Rosenblatt⁴ ont exposé des chiens à 100 ou 300 rads de rayons X. Ils ont observé dans ce lot que la durée de vie diminue d'environ 6% par 100 rads. A l'Université de Rochester, des chiens de même race sont soumis cinq jours par semaine, pendant toute la durée de leur vie aux rayons X à doses faibles et progressives. Chez les chiens qui ont reçu de 0,060 à 0,120 R/jour, la durée de la vie est légèrement supérieure à celle du lot de contrôle.

Pour un débit de 0,6 R/jour, il apparaît une réduction de 5% de la longévité. La dose cumulative varie avec la durée de survie de l'animal (1000 à 2000 rads). Ainsi, ces très fortes doses cumulatives ont provoqué un raccourcissement de la vie équivalent à celui mis en évidence par Andersen et Rosenblatt à la suite d'expositions à 100 R sous des débits de dose importants.

2.2.2 Chez l'Homme^{2,3}

De nombreux organismes (I.C.R.P., National Research Council) ont étudié ce problème avec soin. Il existe de nombreuses incertitudes malgré de très nombreux travaux. En effet, il faut recourir à l'examen de populations humaines exposées à d'importantes doses de rayonnement pour espérer percevoir un raccourcissement de la vie. Si cet effet se produit réellement, ces groupes seront :

- les japonais survivants d'Hiroshima et de Nagasaki,
- les personnes atteintes de spondylite ankylosante traitées par les radiations ionisantes (radiothérapie localisée),
- les médecins et les techniciens radiologistes ayant subi dans le passé des expositions de doses relativement importantes.

Le taux de mortalité du groupe étudié doit être plus élevé que dans la population servant de référence.

Les études humaines sont parfois contradictoires.

- (1) L.Dublin et M.Spiegelman¹⁰ comparent la mortalité des spécialistes US décédés entre 1938 et 1942. Le taux de mortalité est plus élevée chez les radiologistes. La différence de durée moyenne de vie varie de 1 à 3 ans.
- (2) S.Warren²⁰ sur 82411 médecins US décédés entre 1930 et 1954 constate une durée de vie moyenne: 60,5 ans pour les radiologistes, 65,7 ans pour les médecins n'utilisant pas les radiations de façon habituelle.
- (3) W.M.Court-Brown et Doll⁸ ont classé les causes de décès des malades atteints de spondylite ankylosante et traités par radiothérapie externe localisée. Ils comparent les valeurs obtenues avec celles de l'ensemble de la population. Ils observent que le nombre de décès étrangers à la spondylarthrite ankylosante et aux cancers des régions irradiées est plus élevé chez les malades que dans la population de référence.
- (4) R.Seltser et P.E.Sartwell^{12,13} ont étudié les principales causes de mort des radiologues en les comparant à celles des membres de l'Académie d'Ophtalmologie et d'Otorhino-laryngologie dont le taux de mortalité est plus faible. En partant de la médiane d'âge au moment du décès, ces auteurs trouvent que la vie des radiologues avait été environ 5 ans plus brève pendant la période comprise entre 1935 et 1944. Puis, dans les années ultérieures, cette différence diminue. Dans leurs conclusions, R.Seltser et P.E.Sartwell notent avec prudence que l'exposition aux radiations ionisantes peut abréger la vie d'une manière non spécifique. Ces différents travaux montrent, dans une certaine mesure, l'indication d'une augmentation non spécifique de la mortalité. Mais, dans d'autres études apparaissent des discordances.
- (5) W.M.Court-Brown et R.Doll⁷ comparent les causes des décès des 1377 radiologistes britanniques entre 1897 et 1957. Ils ne trouvent pas de différence avec un groupe de médecins non radiologistes.
- (6) R.W.Miller et S.Jablon¹¹ recherchent dans un travail portant sur 18 années chez 6500 techniciens radiologistes ayant fait partie de l'US Army pendant la dernière guerre mondiale s'il existe un accroissement de la mortalité par comparaison avec un groupe de pharmaciens et de chimistes. Ils ne trouvent pas de différence.
- (7) Les publications de l'Atomic Bomb Casualty Commission sur les victimes d'Hiroshima et de Nagasaki affirment qu'il n'y a pas d'élévation régulière du taux des décès par des affections autres que le cancer.

P.Storer et V.P.Bond¹⁶ remarquent qu'on ne sait pas très bien pour quelles raisons les données recueillies sur la réduction de la longévité humaine se contredisent dans une certaine mesure alors que la plupart des recherches expérimentales chez l'animal démontrent une diminution de la longévité.

2.3 Les Risques de Troubles de Développement de l'Embryon^{2,3,9,17}

Ce problème intéresse les femmes-passagers des T.S.S. mais également les femmes-pilotes. En effet, la plupart des Armées de l'Air étudient dès maintenant la possibilité d'utiliser des femmes comme pilotes d'avions de combat, d'avions de transport à réacteur.

L'embryon en voie de développement est formé de tissus très radiosensibles. Les travaux de W.Russell démontrent que l'importance nocive des radiations ionisantes varie avec la phase de développement embryonnaire atteinte au moment de l'irradiation.

Si l'exposition d'ovules qui viennent d'être fertilisés a lieu avant l'implantation, elle entraîne une mortalité élevée, mais les prévisions de vie pour les ovules survivants sont normales. La population des cellules non différenciées que constitue l'embryon non encore implanté peut encore réparer les lésions créées par les radiations ionisantes dans certaines cellules grâce à la présence de cellules "totipotentes" (indifférenciées). Autrement dit, il s'agit d'un effet du "tout ou rien". Les cellules atteintes sont tellement nombreuses que l'embryon meurt. Si les lésions sont peu nombreuses, elles peuvent être remplacées par les mitoses nouvelles des cellules intactes. Ultérieurement, le développement embryonnaire se poursuit normalement.

Si l'exposition a lieu quand une certaine différenciation cellulaire s'est déjà produite, cette repopulation (restauration) par les cellules totipotentes n'est plus possible. On notera alors l'existence des différents types d'anomalies du développement. Ces dernières dépendent étroitement du stade atteint dans l'organogénèse. Ainsi, des troubles du développement du Système nerveux central, des modifications importantes des membres (amélie, hémimélie) surviennent. Chez tous les animaux, cette phase critique de l'organogénèse est souvent très brève. Chez l'homme, elle se situe entre la 2ème et la 6ème semaine embryonnaire.

Au fur et à mesure que le développement de l'embryon se poursuit et que l'organogénèse s'achève, le fœtus du mammifère devient moins radiosensible et prend de plus en plus l'aspect de l'adulte. La dose léthale de radiation pour un fœtus pendant le 3ème trimestre de la grossesse le serait également pour la mère.

Ces constatations de la radiosensibilité fœtale, de la possibilité d'observer des anomalies du développement ont abouti à reconnaître la nécessité de prendre des mesures de prophylaxie dans les examens de radiodiagnostic des femmes en état de procréer.

Mais, aux premiers stades de la gestation, la femme ignore souvent qu'elle est enceinte. Si elle se trouve exposée aux radiations ionisantes et si le fœtus meurt, l'intéressée peut penser qu'il s'agit d'une anomalie du cycle menstruel. Beaucoup de femmes incontestablement présentent ces irrégularités dans le cours normal de l'existence. Il est donc permis de penser que de nombreuses grossesses passent inaperçues à leur début et se terminent par l'expulsion d'un fœtus peu développé. Ce fait en soi est anormal pour des raisons inconnues.

En dehors de ce stade précoce de la grossesse, s'il y a une exposition aux radiation ionisantes, le risque fœtal créé par de faibles doses (atteignant quelques rads) est celui d'affections malignes au cours du premier âge. L'I.C.R.P. recommande de réglementer l'exposition aux radiations ionisantes des femmes en âge d'être mère, de telle façon que la dose reçue par le fœtus ne dépasse pas 1 rem au cours du premier trimestre de la grossesse et 1 second rem pendant le reste de la grossesse.

Ce souci se manifeste dans les recommandations de l'US National Committee on Radiation and Measurements (N.R.C.P.) qui a fixé la dose limite pour un fœtus pour toute la durée de la grossesse à 0,5 rem.

2.4 Evaluation du Risque Carcinogénétique du Rayonnement Cosmique Galactique

Le rayonnement cosmique galactique a des intensités de dose qui varient selon l'altitude, la latitude et un certain degré avec l'activité solaire. Cependant, ces intensités de dose peuvent être considérées comme relativement constantes avec des variations associées aux éruptions solaires entraînant des événements à protons.

Cette intensité de dose à 25 km d'altitude n'excédera pas 2 millirem par heure de vol (en considérant des vols près du Pôle pendant la période d'activité solaire minimale).

S'il est considéré qu'un PN militaire volera à ces altitudes et dans ces conditions 500 heures par an, l'équivalent de dose annuel sera voisin d'un rem. Pour chaque année de vol, l'incidence pour les 25 années suivantes du cancer peut être estimée à 40 cas par 10^6 PN exposés.

Le risque de léthalité pour le passager civil est de 1 pour 300.000 heures de vol. En considérant le même risque de léthalité pour les aviateurs militaires, sur 1 million de PN volant 500 heures par an, on observerait 1700 décès ou 40 fois le risque d'apparition des radiocancers.

Il est bien reconnu que l'estimation du risque du cancer à des doses de l'ordre du rem est donnée avec les plus extrêmes réserves de validité de détermination. Certainement, ce risque du radiocancer est sous-estimé.

3. EVENEMENTS SOLAIRES A PROTONS

Pour le cas qui nous intéresse, les hautes doses doivent être considérées comme celles dépassant les limites de dose d'exposition recommandées par l'I.C.R.P. c'est à dire:

- 10 rem pour une exposition unique de l'ensemble du corps (dose intégrale),
- 25 rem pour une succession d'expositions intégrales.

Dans l'Espace, les événements solaires à protons délivrent des doses importantes à la peau (1 ou plusieurs centaines de rads), parfois plus importantes en profondeur. Cependant, l'épaisseur résiduelle de l'atmosphère à 25 km d'altitude modifie le spectre de protons en éliminant les basses énergies et en réduisant de façon importante l'intensité de dose. Pour ces raisons, à 25 km et a fortiori pour des altitudes plus basses, l'intensité de dose excède très rarement 100 millirem par heure.

L'estimation statistique de la possibilité d'une irradiation intégrale d'un PN militaire en opération dépassant 10 rem est si faible que de nombreux auteurs estiment qu'elle peut être négligée.

En considérant que l'intensité de dose soit multipliée par un facteur 10, que la sortie opérationnelle excède 10 heures (hypothèse peu réaliste), la dose intégrale dépasserait 10 rem, en admettant que la possibilité d'un tel événement à protons soit élevée.

4. IONS LOURDS

A partir de 18 km d'altitude, le flux de particules de $Z > 2$ (ions lourds) de perte d'énergie augmente de façon significative. De telles particules, nous l'avons vu, entraînent une importante ionisation le long de leur trace qui dans les tissus atteint parfois 1 diamètre de 20 microns (dimensions de cellule). La longueur de la trace qui dépend de la nature et de l'énergie de la particule incidente varie de quelques mm à plusieurs centimètres.

Aucune partie de l'organisme humain n'est hors de portée. De plus, il existe le long de la trace, des étoiles d'interactions qui sont capable de créer des lésions étendues à leur voisinage (expériences sur la peau et le tissu cérébral (Haymaker, Pfister et Nogues). L'utilisation du rad comme unité d'absorption apparaît peu réaliste pour de nombreux auteurs car elle est applicable à un rayonnement homogène et non à des particules dont l'effet est individuel.

Certaines cellules atteintes pourront être tuées ou modifiées fonctionnellement mais il est difficile d'évaluer avec précision les résultats d'une telle ionisation sur le taux de production des tumeurs ou leur influence sur la létalité de l'individu. On peut penser que ces destructions minimales entraînent des effets beaucoup plus importants qu'on ne l'escomptait. Par exemple, une atteinte de la fovea entraînerait un certain aveuglement (scotome). Il en est de même des effets sur le cerveau et il faut pour ce dernier tenir compte du taux de destruction spontanée des cellules nerveuses qui est de l'ordre de 10^4 neurones par jour.

Les expérimentations de Beckman sur l'oeil du singe Rhésus (voir 2ème Rapport: Delahaye et Pfister) démontrent la possibilité d'observer des atteintes rétinienne (hémorragies, nécrose) par atteinte d'ions lourds $0^{\circ}8$. Il est possible de rencontrer de tels effets chez le P.N. Certes, le flux d'ions lourds dans le rayonnement cosmique galactique est de l'ordre de $10^2 \text{ cm}^{-2}/\text{heure}$. Le risque de voir apparaître des lésions rétinienne en haute altitude est faible mais son évaluation reste très difficile. Il en est de même pour les risques de l'exposition du cerveau mais l'accord semble exister pour affirmer la plus grande fréquence probable des altérations rétinienne superficielles.

5. CONCLUSIONS

Les risques de l'irradiation du rayonnement cosmique galactique et des protons solaires sont très faibles. Des études sur les ions lourds doivent être poursuivies pour préciser un certain nombre d'incertitudes qui persistent actuellement.

De plus, la discussion des effets ou plutôt des dangers créés par les faibles doses de radiation est toujours ouverte. Il faut bien reconnaître que l'extrapolation à partir des doses élevées pour les doses faibles permet de dire que très probablement, on a surestimé les véritables risques. En s'appuyant sur les évaluations de l'I.C.R.P. qui représentent les meilleures estimations dont on dispose actuellement, on peut conclure que les dangers dus à l'exposition aux rayonnements extraterrestres jusqu'à 25 km sont très faibles.

L'analyse des différents travaux ne permet pas d'affirmer avec certitude l'apparition d'une réduction de la longévité du P.N. Les estimations du taux des radioleucoses et des radiocancers méritent d'être discutées.

LES CHAMPS ELECTROMAGNETIQUES NON-IONISANTS FACTEURS D'ENVIRONNEMENT EN MILIEU MILITAIRE

par

Médecin Principal B.Servantie
Spécialiste de Recherches du Service de Santé des Armées
France

et

Captain P.E.Tyler, MC
US Navy
USA

INTRODUCTION

La découverte de l'électromagnétisme¹¹⁶ remonte au siècle dernier, avec les travaux de Harvey, Helmholtz et Thomson. Faraday puis Maxwell élaborèrent la théorie du champ électromagnétique. Cette théorie fut vérifiée pour la première fois par Hertz. Par la suite, Tesla, Branly, Lodge, Popov réussirent la transmission de signaux à distance. Enfin, avec Marconi, la TSF devint réalité.

La première expérience de détection à distance remonte à 1904. Mais il fallut attendre 1937 pour la première réalisation pratique, sur l'aérodrome du Bourget, bien que Tesla eut décrit le radar, sans employer le mot, en 1917.

Le radar, tel que nous le connaissons, s'est développé pendant la dernière guerre mondiale. Par la suite, il a subi une croissance quasi exponentielle. D'abord réservé aux seuls usages militaires, il s'est généralisé au point d'être utilisé partout: les gendarmes mesurent la vitesse des voitures, il avertit de l'approche d'intrus, etc... Bientôt, il essaiera d'éviter les accidents de voitures. En même temps, ses usages se sont diversifiés, et les utilisations industrielles, médicales, culinaires même, se multiplient.

L'existence de ces générateurs de rayonnement électro-magnétique pose le problème de leurs effets sur les êtres vivants, et de l'existence d'éventuels dangers. Les nombreux travaux effectués dans ce domaine ont permis de mieux connaître ces rayonnements et leurs effets biologiques. Mais ces connaissances sont encore insuffisantes, d'autant plus qu'elles laissent entrevoir des possibilités d'action sur la matière vivante, possibilités qui entraîneront certainement des progrès considérables tant pour la compréhension fondamentale des mécanismes vitaux que pour la thérapeutique de nombreuses maladies.

Nous allons essayer de faire le point des connaissances dans ce domaine en rappelant quelques données physiques et techniques indispensables, puis en exposant ce que nous savons des effets biologiques de ces rayonnements.

L'étude des troubles pathologiques chez l'homme nous conduira aux standards de sécurité et à la médecine du travail. Enfin nous essaierons de définir ce que l'on peut attendre de l'évolution des recherches en cours.

1. HISTORIQUE

Il est possible de faire remonter les premières études aux travaux de d'Arsonval¹¹⁵, à la fin du siècle dernier. Par la suite, certains chercheurs, généralement isolés tels que Lakhovsky¹¹⁷ ou Van Everdingen^{118,119} ont repris ces recherches. L'intérêt pour les effets biologiques de ces rayonnements s'est alors déplacé d'abord vers l'Ouest aux USA puis vers l'Est en URSS, et les recherches ne sont plus le fait d'individus, mais sont coordonnées dans des programmes importants.

Le plus connu est le Programme Tri Service¹ du Ministère de la Défense des USA, programme dirigé de 1956 à 1960 par les Docteur Knauf, de l'USAF. Pour la première fois, une tentative méthodique a été faite pour explorer un domaine qui s'avérait déjà très important.

Les avis ou affirmations contenus dans le texte sont ceux des auteurs et ne peuvent être considérés comme reflétant les opinions du Ministère de la Défense (F) ou du Ministère de la Marine (USA).

Pour les références voir la page 58 du texte anglais

A peu près parallèlement, de nombreux laboratoires d'URSS^{120,121} se sont consacrés aussi à ces recherches, sous la direction essentiellement de l'académicien Presman et de Madame Gordon.

Vers 1960, les conclusions tirées de ces deux programmes ont fait apparaître une discordance importante entre les résultats américains et soviétiques, qui se manifesta surtout au niveau des standards de sécurité.

Par la suite, un désintérêt général s'est fait sentir, conduisant à l'abandon quasi-total des recherches aux USA, tandis que plusieurs laboratoires soviétiques se tournaient vers d'autres domaines, comme la parapsychologie.

L'étude des effets biologiques des rayonnements radioélectriques est alors abordée en France (CERMA⁹ pour l'Armée de l'Air puis CERB^{6,38} pour la Marine) puis dans d'autres pays. L'OTAN décide en 1970 d'élaborer ses propres standards de sécurité. Le gouvernement des USA¹²² lance un nouveau programme de recherches, programme qui n'est plus seulement militaire mais implique de nombreuses administrations civiles. L'Organisation Mondiale de la Santé prend conscience de l'importance biologique de ces rayonnements et organise en 1973 à Varsovie³ un Symposium important. La Communauté Economique Européenne décide de se doter d'une législation dans ce domaine. Bref, ces rayonnements deviennent l'objet d'un intérêt général.

2. RAPPEL PHYSIQUE

Les rayonnements électro-magnétiques sont étudiés depuis longtemps. Ils sont connus empiriquement par tout le monde: le prototype en est en effet la lumière. Sans vouloir entrer dans trop de détails superflus pour les biologistes et les médecins, il est nécessaire de les décrire, et de définir un certain nombre de paramètres qui permettent de les caractériser. Après avoir étudié leur constitution, nous passerons en revue les paramètres descriptifs qui peuvent se classer en 3 catégories: fréquence, modulation et puissance.

Il est tout d'abord indispensable d'exclure les ultra-sons de notre étude: ils sont constitués par une onde de pression et non par une onde électro-magnétique, mais trop de gens ne comprennent pas la différence. Les ondes électro-magnétiques sont ainsi nommées car elles sont constituées d'un champ électrique E et d'un champ magnétique H, en phase, orthogonaux entre eux et orthogonaux à la direction de propagation (cf Fig.1). Ces champs varient selon une loi sinusoïdale identique: ils sont donc constamment en phase. Leur résultante est le vecteur de Poynting. La fréquence selon laquelle leur amplitude varie est la fréquence propre (ou fréquence porteuse, dans certains cas); elle est liée à la longueur d'onde par la relation

$$\lambda = \frac{c}{N} \quad (1)$$

c étant la célérité de la lumière dans le milieu considéré. Fréquence ou longueur d'onde permettent de les classer à l'intérieur du spectre électro-magnétique. Les ondes utilisées pour le radar ne présentent en effet aucune différence de nature avec la lumière visible, les rayons ultra-violet, etc... Le spectre électro-magnétique (cf Fig.2) est continu depuis les ondes très longues, dont la longueur d'onde dépasse le millier de kilomètres pour une fréquence de quelques hertz, jusqu'aux rayonnements gamma dont la fréquence atteint 10^{24} Hz pour une longueur d'onde inférieure à 10^{-13} cm. Ce spectre est grossièrement divisé en deux parties: les rayonnements ionisants, et les rayonnements non-ionisants.

Les premiers ont une longueur d'onde inférieure à celle de la lumière visible; leur fréquence est donc supérieure. Leur énergie, établie selon la relation d'Einstein

$$W = h \nu \quad (2)$$

(h étant la constante de Planck = $6,6252 \times 10^{-34}$ J.s, et ν étant la fréquence) est importante (cf. Tableau I). Il est admis actuellement que la limite entre rayonnements ionisants et non-ionisants correspond à une énergie de 13,6 eV, soit une longueur d'onde d'environ 0,1 micron, située dans l'ultra-violet lointain.

Par contre, les rayonnements qui nous intéressent ont une longueur d'onde supérieure à celle de la lumière visible et une fréquence inférieure; leur énergie (cf Tableau I) est donc insuffisante pour qu'ils puissent avoir un effet ionisant direct. Mais il se produit souvent avec ces rayonnements un phénomène qui intrigue ou inquiète les spectateurs: les tubes fluorescents d'éclairage ou les lampes néon s'allument quand ils sont irradiés par un rayonnement radar. Le champ électrique constituant du rayonnement en cause est dans ce cas suffisant pour accélérer les ions libres du gaz contenu dans le tube; la pression du gaz étant suffisamment faible, leur libre parcours est assez grand pour que ces ions puissent alors, en heurtant d'autres atomes, les ioniser par choc. Cette propriété permet, dans certains cas, d'utiliser un tube néon comme détecteur; il faut que le champ électrique soit assez intense, c'est-à-dire que le seuil d'allumage sera différent pour un rayonnement continu ou un rayonnement pulsé.

Dans la partie non ionisante du spectre électro-magnétique, les rayonnements ultra-violet, visibles et infra-rouges ne nous concernent pas. Notons au passage que l'identité de nature entre les rayonnement infra-rouges et les

rayonnements radio-électriques a été confirmée expérimentalement. La partie radio-électrique du spectre a été divisée en plusieurs gammes de fréquence (cf Fig.3). En pratique, seules les 3 gammes supérieures sont utilisées en radar; il est généralement admis que les hyperfréquences sont comprises entre 300 mégahertz et 300 gigahertz, étendue qui est divisée en plusieurs bandes désignées par des lettres: P, L, S, etc... Deux fréquences particulières ont été attribuées, par accord international, aux usages industriels, commerciaux, médicaux, etc... = 935 MHz (32 cm) et 2450 MHz (12,5 cm).

Les progrès techniques et l'augmentation des besoins des télécommunications ont conduit à une augmentation des fréquences. En effet, plus une fréquence est élevée, plus grande est la densité d'information qu'elle peut transporter. La transmission de la parole et de la musique nécessite une fréquence plus élevée que la transmission de signaux Morse (télégraphie); la télévision est encore plus exigeante; actuellement, l'utilisation de satellites pour les liaisons inter-continentales fait utiliser des fréquences jadis uniquement employées par les radars.

Le choix de ces fréquences élevées pour le radar résulte d'un compromis: les fréquences élevées se réfléchissent mieux sur les obstacles; plus la longueur d'onde est courte, plus petits seront les obstacles que le rayonnement permettra de voir; enfin, plus la fréquence est élevée, moins le matériel est encombrant; par contre, les fréquences élevées sont plus absorbées par l'eau (humidité ambiante, pluie); et enfin, elles sont plus difficiles à produire, le matériel étant plus complexe et plus fragile.

L'emploi de ces rayonnements en radar classique va imposer une modulation particulière. Le radar est utilisé pour "voir" des obstacles situés à des distances parfois très grandes. Il est donc nécessaire d'employer un émetteur puissant qui alimente une antenne de grandes dimensions, pour concentrer le rayonnement en un faisceau le plus étroit possible. L'onde émise va se réfléchir sur un obstacle qui n'est pratiquement jamais un miroir, et qui va donc renvoyer l'énergie dans toutes les directions. Seule une infime fraction de la puissance émise va revenir vers l'observateur. Il faut donc la recueillir avec une antenne de gain élevé, donc de grandes dimensions et l'envoyer dans un récepteur très sensible. Le voisinage de deux grandes antennes est rarement possible, et le fonctionnement simultané d'un émetteur très puissant et d'un récepteur très sensible entraîne la destruction immédiate du récepteur. Cette difficulté a été tournée en utilisant la même antenne pour les deux appareils: l'émetteur fonctionne pendant une brève durée, produisant une impulsion, alors que le récepteur est "aveugle", puis l'émetteur est arrêté pendant que le récepteur entre en fonction. Ce rayonnement est dit modulé en impulsions (cf Fig.4); on utilise aussi le terme PW (pulsed wave) par opposition avec un champ CW (continuous wave) comme ceux utilisés dans les fours. Avec une modulation par impulsions, la fréquence porteuse n'est émise que pendant des durées de l'ordre de la micro-seconde, séparées par des durées environ mille fois plus grandes. Il est alors important de connaître la durée de l'impulsion et la période ou la fréquence de répétition (PRF: pulse repetition frequency). Les radars classiques ont en général des durées d'impulsion comprises entre 0,1 et 5 microsecondes, la fréquence de répétition étant comprise entre 100 et 10.000 Hz. Ces deux paramètres définissent la portée utile, la distance aveugle et le pouvoir séparateur dans l'axe. Ils doivent être complétés par une troisième notion: la fréquence de balayage; en effet, l'aérien se déplace pour permettre au faisceau d'explorer une certaine zone de l'espace; il est en général animé d'un mouvement tournant, ou parfois d'un mouvement oscillant, et le faisceau, sauf pour certains radars utilisés pour l'artillerie ou le guidage des missiles, ne reste pas fixé dans une même direction.

Deux nouvelles techniques sont venues modifier cette situation. D'une part, on rencontre de plus en plus souvent des antennes à balayage électronique par déphasage. Ici, l'aérien est fixe et le faisceau seul se déplace avec une agilité bien supérieure; mais un inconvénient pour le personnel apparaît: il devient impossible de savoir, en regardant l'aérien, dans quelle direction est pointé le faisceau. La deuxième technique touche aux impulsions: elles sont beaucoup plus longues, leur fréquence de répétition étant plus faible, et elles sont traitées à la réception pour restituer l'information qu'elles contiennent: c'est la méthode de compression d'impulsion.

La modulation par impulsions surajoutée à la fréquence porteuse vient compliquer la détermination de l'énergie transportée par le faisceau, et risque de laisser une ambiguïté. Pour l'ingénieur, le plus important est la puissance émise; pour le médecin, c'est la puissance reçue par le sujet. Au niveau de l'émetteur, le cas le plus simple est celui de l'émission CW: le calcul et la mesure permettent de déterminer la puissance de l'appareil. Dans le cas d'un rayonnement pulsé (cf Fig.5), il faut distinguer puissance moyenne (P_m) et puissance de crête (P_c). La première correspond à l'énergie libérée par unité de temps, par exemple une seconde; mais la puissance ne va pas être uniformément répartie dans cette seconde; au contraire elle va être condensée dans les quelques microsecondes de durée totale des impulsions. Il devient nécessaire de définir une puissance de crête, correspondant à la puissance maximale à un instant donné, donc au sommet de l'impulsion, et une puissance moyenne, que l'on peut calculer par:

$$P_m = P_c \times \tau \times N \quad (3)$$

(τ étant la durée de l'impulsion et N , la fréquence de répétition). Pour des rayonnements pulsés des puissances de crête de plusieurs mégawatts sont courantes, les puissances moyennes atteignent plusieurs kilowatts.

Quand le rayonnement est émis en espace libre, il transporte de l'énergie. A un endroit donné de l'espace, il est possible de mesurer ou de calculer la quantité d'énergie existante. On définit alors la densité de puissance à cet endroit, exprimée en W/m^2 ou plus couramment mW/cm^2 . Il faut là aussi préciser s'il s'agit de densité de puissance

crête ou de densité de puissance moyenne. Cette densité de puissance peut être calculée par la formule:

$$dp = \frac{P \times G}{4\pi R^2} \quad (4)$$

P étant la puissance (crête ou moyenne selon le cas) en watts, G le gain de l'aérien, R la distance par rapport à l'aérien en mètres, dp étant exprimée en W/m².

Il serait parfois préférable de déterminer la puissance réellement absorbée par le sujet en W ou mW par gramme. Mais ce n'est malheureusement pas toujours réalisable, même au laboratoire, et il est souvent nécessaire de se contenter de la mesure de la densité de puissance incidente.

Il nous faut maintenant considérer le devenir du rayonnement quand il a quitté l'antenne. On a généralement tendance à le considérer comme un faisceau de projecteur, plus ou moins conique, avec son sommet sur l'aérien. Ceci est vrai, mais uniquement à partir d'une certaine distance. Dans le voisinage de l'antenne, la situation est plus complexe.

Les antennes sont caractérisées par leur diagramme de rayonnement, qui décrit la forme du champ dans le voisinage de l'aérien: ce diagramme montre l'existence de lobes latéraux et postérieurs (cf Fig.6) où la densité de puissance peut ne pas être négligeable. Ceci explique donc que du personnel puisse être irradié sans être dans l'axe du faisceau, ou même en étant derrière l'aérien.

Dans l'axe même, l'onde n'est réellement formée avec concordance de phases entre ses champs constituants qu'au delà d'une certaine distance. Les physiciens délimitent en fait trois zones (cf Fig.7):

- la zone de Fresnel en deçà d'une limite égale à $\frac{D^2}{4\lambda}$, D étant la plus grande dimension de l'aérien, et λ étant la longueur d'onde;
- une zone intermédiaire entre $\frac{D^2}{4\lambda}$ et $\frac{D^2}{\lambda}$;
- la zone de Fraunhofer au delà $\frac{D^2}{\lambda}$

Il se surajoute à ces limites la distance de Rayleigh: c'est la distance pour laquelle les chemins parcourus par deux rayons, l'un issu du centre de la source, l'autre de la périphérie, ne diffèrent pas de plus de $\lambda/4$. Cette distance est approximativement égale à $D^2/2\lambda$. Elle se situe donc dans la zone intermédiaire. Selon les auteurs, la région où le champ est constitué, ce que l'on nomme le champ lointain, commence soit à la distance de Rayleigh, soit à la zone de Fraunhofer. Dans la région située plus près de l'aérien, ou champ proche, il devient très difficile de déterminer correctement la valeur de la densité de puissance. Le Tableau II montre que cela peut parfois compliquer le travail de la personne qui est chargée de cette détermination.

Une fois parvenu au champ lointain, le rayonnement va se propager dans l'espace. Comme le faisceau n'est pas cylindrique, la densité de puissance par unité de surface va décroître avec le carré de la distance (cf. équation 4); elle va de plus subir une atténuation qui dépend de la transparence du milieu pour la fréquence considérée: cette transparence décroît en fonction de l'augmentation de fréquence, et surtout de la teneur en eau de l'atmosphère, au moins pour les fréquences élevées. L'eau de mer constitue un cas particulier qui explique la nécessité de techniques autres que le radar pour la détection sous-marine: on admet un coefficient d'atténuation de 40 dB (soit 10^4) par mètre.

Enfin le rayonnement atteint l'obstacle. Il se divise alors en deux: une partie est réfléchi et forme l'écho-radar, l'autre pénètre dans l'obstacle. Il apparaît alors une différence majeure entre les ingénieurs et les biologistes et médecins. Les premiers s'intéressent à l'écho, les seconds à l'énergie qui pénètre dans l'obstacle, tout au moins quand cet obstacle est un être vivant, essentiellement un homme.

La fraction du rayonnement qui pénètre dans la matière dépend du coefficient de réflexion (cf Fig.8) de l'interface:

$$I = I_0(1 - R) \quad (5)$$

Ce coefficient de réflexion dépend des propriétés électriques et magnétiques de la matière pour la fréquence en cause (cf Fig.9), de même que le coefficient d'atténuation du rayonnement se propageant dans cette matière; on définit ainsi une profondeur de pénétration "d", distance pour laquelle la densité de puissance est divisée par e (base des logarithmes népériens). La densité de puissance à une distance "x" est donnée par:

$$I_x = I_0 \times e^{-(x/d)}$$

La profondeur de pénétration (cf Fig.10) décroît très rapidement quand la fréquence augmente: par exemple, dans le sang, elle passe de 0,78 cm pour 3 GHz à 0,15 cm pour 10 GHz.

Pour terminer ce chapitre, il est nécessaire de mentionner un risque non lié aux hyperfréquences. Pour la production des ondes, les tubes font appel à des tensions électriques élevées. Il faut donc tenir compte de la production éventuelle de rayons X à certains endroits. Les générateurs faisant appel aux semi-conducteurs (diodes Gunn, Impatt, etc...) ne présentent pas les mêmes risques, mais ils sont beaucoup moins puissants.

3. EFFETS BIOLOGIQUES DES MICRO-ONDES

La caractéristique principale des ondes électro-magnétiques utilisées pour le radar est de se réfléchir sur les obstacles. Nous avons vu précédemment que seule une fraction du rayonnement se réfléchissait, le reste pénétrant dans la matière. La présence de ce rayonnement à l'intérieur de la matière vivante ne peut intéresser le biologiste que dans la mesure où existent des interférences entre le champ et les mécanismes vitaux.

Les nombreux travaux consacrés à ce problème dans le monde entier ont montré que ces interférences existent. Mais il persiste une controverse au sujet des mécanismes mis en jeu.

Les résultats obtenus aux USA par le programme Tri-Service^{1,2} ont étudié les effets sur les organismes vivants de la chaleur dégagée in situ par les rayonnements hyperfréquences. Ces effets thermiques sont les plus évidents: il suffit de mettre la main devant un cornet émettant un rayonnement de quelques watts pour en ressentir l'existence. Pendant ce temps, les travaux réalisés en URSS^{120,121} montraient l'existence d'autres effets, ne paraissant pas dus à ce dégagement de chaleur. Depuis plus de 10 ans, il existe un désaccord général sur l'existence ou l'inexistence de ces derniers effets, qui ont été qualifiés de "spécifiques" ou de "non-thermiques". Nous reviendrons sur ces deux catégories d'effets biologiques par la suite, mais nous avons essayé de démontrer ici que, souvent, la controverse provenait d'une mauvaise compréhension des phénomènes. Nous avons analysé une cinquantaine d'articles de diverses origines, rapportant des résultats expérimentaux et concluant à l'existence ou à l'absence d'effets d'origine non thermique. Nous les avons portés sur un diagramme (cf Fig.11) en fonction de la densité de puissance incidente utilisée et de la durée de l'irradiation. Chaque résultat est représenté par un signe (+) ou (-), selon qu'il conclut à l'existence (+) ou à l'inexistence (-) d'effets non thermiques, et par son numéro de référence dans la bibliographie.

Il apparaît d'après les résultats que les signes (-) sont groupés dans le quadrant supérieur gauche, correspondant aux densités de puissance élevées et aux durées d'irradiation courtes. Inversement, les signes (+) sont groupés dans le quadrant inférieur droit, correspondant aux densités de puissance faibles et aux longues durées d'irradiation. Seuls six articles se placent dans le quadrant inférieur gauche, où les faibles densités de puissance sont associées aux courtes durées d'impulsions.

Les limites entre les quatre quadrants sont évidemment impossibles à chiffrer avec précision. Il est toutefois possible de les évaluer à 20 mW/cm² pour les densités de puissance, à 24 heures pour des durées d'irradiation, ces valeurs numériques n'ayant que valeur indicatrice.

Une conclusion s'impose: les deux catégories d'articles ne parlent pas de la même chose; l'existence de la controverse dont nous avons parlé devient alors inévitable, mais sans objet. Il est difficile d'expliquer la disparité entre ces deux groupes de résultats. Quatre hypothèses sont possibles

- il existe une durée minimale indispensable pour que des effets non-thermiques puissent apparaître quelle que soit la densité de puissance incidente; dans ce cas, pour de fortes densités de puissance, la surcharge thermique imposée à l'animal d'expérience interdirait la prolongation de l'irradiation pendant un temps suffisant;
- le temps d'apparition des effets non-thermiques est fonction de la densité de puissance; dans ce deuxième cas, l'existence d'un effet thermique important masquerait les effets non-thermiques qui ne pourraient alors se développer;
- les effets non-thermiques n'existent que pour des densités de puissances inférieures à une valeur-limite; au-dessus de cette valeur, les mécanismes seraient inhibés et l'effet n'apparaîtrait plus;
- les effets non-thermiques font appel à différents mécanismes, les effets aigus de quadrant inférieur gauche étant différents des effets chroniques du quadrant inférieur droit.

En règle générale, la terminologie habituelle baptisant "thermiques", "non-thermiques" ou "spécifiques" les effets biologiques dus aux hyperfréquences ne nous paraît pas avoir d'utilité autre que pratique. Dans ce sens, une des conclusions du Symposium réuni à Varsovie par l'Organisation Mondiale de la Santé³ nous semble très intéressante. Elle distingue trois gammes de densités de puissance: une gamme élevée, supérieure à 10 mW/cm²; une gamme faible inférieure à 1 mW/cm²; une gamme intermédiaire, comprise entre 1 et 10 mW/cm². Sur le diagramme de la Figure 11, le quadrant supérieur gauche correspondrait à la première gamme, la limite étant alors légèrement remontée aux environs de 20 mW/cm². La moitié inférieure correspondrait aux deux autres gammes, la limite entre gamme intermédiaire et gamme inférieure ne pouvant pas être mise en évidence par le diagramme.

Il est aussi indispensable de définir avec précision le sens donné aux qualificatifs "thermiques" et "non-thermiques", si l'on désire continuer à les utiliser. Une définition pratique consiste à attribuer le mot "thermique" à tout effet reproductible par un autre moyen que les hyperfréquences, le mot "non-thermique" étant alors réservé aux effets non reproductibles ainsi. Mais beaucoup d'autres définitions sont possibles.

Malgré les critiques que nous venons de leur faire, nous continuerons ici à utiliser ces mots, en raison de leur usage généralisé.

4. EFFETS THERMIQUES EXPERIMENTAUX

Nous allons étudier ici les effets biologiques expérimentaux pour lesquels le dégagement de chaleur dans les tissus paraît être le mécanisme d'action du rayonnement.

Les très nombreux travaux consacrés à cette catégorie d'effets ont mis en évidence l'importance de la fréquence: les fréquences les plus élevées sont absorbées dans les premiers millimètres, essentiellement par la peau, alors que les fréquences plus basses pénètrent plus profondément. Après avoir pénétré dans les tissus, l'énergie électromagnétique^{102,103} se transforme en énergie thermique par deux mécanismes: conduction ionique et surtout excitation de la relaxation diélectrique de certaines molécules, particulièrement des molécules d'eau.

Cette transformation en énergie thermique peut se produire soit dans tout l'organisme au cours d'une irradiation générale, soit dans certains viscères au cours d'une irradiation localisée. Une irradiation générale⁵³, pour des densités de puissance élevées, entraîne la mort de l'animal par hyperthermie. La température centrale s'élève et peut se stabiliser temporairement tant que les mécanismes thermolytiques ne sont pas dépassés; lorsque ces mécanismes cèdent, la température recommence à monter jusqu'à une valeur léthale. Si la quantité d'énergie est d'emblée trop importante, la période de stabilisation n'apparaît pas et la température interne monte jusqu'à la mort de l'animal, ou plutôt jusqu'à ce que soit atteint un équilibre entre gain et perte de chaleur: il s'agit là d'une sorte de "cuisson" de l'animal. L'hyperthermie ainsi provoquée s'accompagne de divers phénomènes tels que salivation, comportement de fuite, convulsions, etc...

Une irradiation localisée à la tête²⁸ peut entraîner des manifestations analogues. L'encéphale est en effet un organe très sensible à toute augmentation de température. D'autres organes aussi sont particulièrement sensibles, par exemple les testicules²⁷ qui peuvent montrer tous les stades de lésion jusqu'à la brûlure, après exposition à de fortes densités de puissance.

L'exposition de femelles gestantes⁶⁶ à une densité de puissance supérieure à 100 mW/cm², peut entraîner l'apparition de malformations foetales de divers types.

Pour des densités de puissance moins élevées, l'animal réagit à l'apport thermique par des perturbations plus ou moins prolongées de ses paramètres cardio-vasculaires et respiratoires.

Au niveau de la peau un effet analeptique² a été décrit chez l'animal anesthésié irradié avec un rayonnement de fréquence élevée (10 GHz) et une densité de puissance de 200 mW/cm²: la température de la peau a été évaluée à 45° C, température suffisante pour entraîner des sensations douloureuses suffisantes pour éveiller l'animal.

L'irradiation de l'oeil a intéressé de nombreux chercheurs⁸⁶. Le cristallin, par sa structure lamellaire et son type de vascularisation, présente une sensibilité particulière à la chaleur. De nombreux travaux ont étudié la formation de cataractes après irradiation, en fonction de la fréquence et de la durée d'exposition. La localisation des lésions paraît liée à la fréquence, de plus en plus antérieure quand la fréquence augmente. L'existence d'un seuil de densité de puissance n'est pas clairement établie, de même que celle d'un effet cumulatif.

Toutes ces études ont pour caractéristiques communes d'utiliser des densités de puissance élevées, et d'être fonction de la densité de puissance moyenne. Elles sont trop nombreuses pour pouvoir être toutes analysées ici. Nous renvoyons pour davantage de détails aux revues presque exhaustives qui existent.

5. EFFETS NON THERMIQUES EXPERIMENTAUX

Cette catégorie d'effets biologiques est beaucoup plus mystérieuse que la précédente. C'est aussi la plus intéressante. Nous avons vu qu'elle était responsable d'une controverse internationale qui n'est pas éteinte. Elle soulève en effet plusieurs questions. La première se rapporte à leur existence: les rayonnements hyperfréquences sont-ils, oui ou non, responsables d'effets biologiques dans une gamme de densités de puissance pour lesquelles le dégagement de chaleur est minime? Pour notre part, avec l'acquit expérimental dont nous disposons, nous répondrons oui^{73,104}. Ensuite, se posent les questions de la nature de ces effets biologiques, et de la nature du ou des mécanismes par lesquels les rayonnements électromagnétiques les produisent. Ce sont des questions auxquelles il est très difficile de répondre, d'une part en raison du très grand nombre et de la diversité des effets qui ont été décrits, d'autre part

en raison de l'insuffisance de données théoriques et expérimentales. Actuellement, à de très rares exceptions près, il est seulement possible d'émettre des hypothèses.

Certains de ces effets ont été étudiés sous l'angle biophysique¹²³ et leur mécanisme est au moins partiellement connu: il s'agit du phénomène des chaînes de perles, de l'orientation de structures asymétriques et de la pompe électro-magnétique.

Quand elles sont soumises à un champ électro-magnétique suffisant en milieu liquide, des particules de petite taille, de l'ordre de quelques microns, s'alignent dans le milieu en files plus ou moins longues. Ce phénomène a été étudié pour des particules de polystyrène ou de silicone, pour des bactéries, pour des érythrocytes. La théorie qui l'explique fait appel aux interactions entre champ et dipôles électriques et est en bonne concordance avec les constatations expérimentales.

Si les particules sont asymétriques, elles orientent leur grand axe par rapport au champ. Le champ électrique nécessaire est plus faible que pour les chaînes de perles. Il est vraisemblable que cette orientation résulte de courants ioniques induits dans le milieu.

Enfin, quand un champ est appliqué entre deux électrodes linéaires non parallèles, il se produit un phénomène de pompe et les particules sont expulsées par l'extrémité la plus étroite. Dans ce cas, le phénomène est lié aux inhomogénéités du champ.

Dans les trois cas cités, obtenus *in vitro*, il a été possible d'élaborer une théorie nouvelle, ou d'adapter une théorie déjà existante, qui explique le phénomène. Ce n'est malheureusement pas le cas pour les exemples suivants, résultats d'expérimentations chez l'animal; nous nous trouvons souvent en présence de contradictions entre faits expérimentaux et théorie admise.

Les effets biologiques obtenus chez l'animal en l'exposant à des densités de puissance faibles, en général inférieures à 10 ou même 1 mW/cm², sont très nombreux. Il est impossible de les décrire tous dans le détail, alors qu'il existe déjà des revues générales ou des livres qui les décrivent. Nous nous limiterons à quelques exemples, en essayant en particulier de choisir ceux pour lesquels il existe une hypothèse explicatrice, vraie ou fausse.

Un des plus connus est le fait qu'il soit possible d'entendre certains radars⁴⁹. Le sujet, ayant la tête dans le faisceau, perçoit un bruit dont la fréquence correspond à la fréquence de répétition des impulsions. Deux théories s'opposent à propos de ce phénomène:

- la plus ancienne¹²⁴ fait appel à une action directe du rayonnement sur le cortex, produisant une excitation des neurones de la zone temporale qui réagissent par la perception d'un bruit; cette théorie s'appuie sur certains arguments soit expérimentaux, comme le fait que la perception disparaît si l'on masque la région temporale et non si le masque est devant l'oreille, l'irradiation étant latérale, soit théoriques en déterminant les seuils de densités de puissance crête pour diverses fréquences et en calculant que les valeurs deviennent égales au niveau du cortex;
- la plus récente¹²⁵ explique le phénomène par une expansion thermique de l'endolymphe provoquée par chaque impulsion, la dilatation ainsi produite étant capable d'exciter la cochlée et donc de produire la perception d'un bruit.

A notre avis, il existe une possibilité de trancher pour l'une ou l'autre de ces théories par une expérience, proposée par Frey mais à notre connaissance non encore réalisée: elle consiste à créer chez des animaux un réflexe conditionné à ce bruit, puis à les rendre sourds par destruction de la cochlée ou section de la 8^e paire: si l'animal réagit au stimulus, il ne peut s'agir que d'une action directe corticale; s'il ne réagit plus, l'action se faisait au niveau de l'oreille interne. Bien que d'apparence simple, cette expérience est en fait complexe à réaliser.

Une série de travaux d'origine canadienne^{127,128} étudie l'action des micro-ondes sur les oiseaux en vol (perruches) ou au sol (poules). Il apparaît une série de perturbations portant essentiellement sur le comportement, le fonctionnement neuro-musculaire et l'équilibre. Il ressort de ces études que les plumes se comportent comme des détecteurs d'ondes de grande sensibilité; l'oiseau, apte à détecter des champs électro-magnétiques très faibles, réagirait anormalement au champ artificiel auquel on le soumet, champ dont l'intensité, bien que faible, est supérieure à celle des champs naturels rencontrés dans la nature.

Dans un autre travail¹¹⁰, toujours sur des poules, l'irradiation avec une densité de puissance de 1 mW/cm² a produit une nette augmentation du nombre d'oeufs pondus; mais cette augmentation de la ponte s'est accompagnée d'un doublement du taux de mortalité.

Le Système Nerveux Central (SNC) s'avère un organe particulièrement sensible aux hyperfréquences, et il est difficile de dénombrer les travaux qui lui ont été consacrés dans le monde entier, malgré de sérieuses difficultés méthodologiques: par exemple, il est impossible, pour des raisons théoriques de placer des électrodes d'enregistrement d'électro-encéphalogramme (EEG) sur un animal en cours d'irradiation: le métal focalise le champ électro-magnétique et ce dernier peut atteindre des valeurs très élevées, pratiquement impossibles à déterminer mais très supérieures au champ incident.

Pour notre part⁶⁶, nous irradiions les animaux et nous ne disposons les électrodes qu'après l'arrêt de l'irradiation. Nous avons ainsi mis en évidence des perturbations importantes à type de bouffées paroxystiques avec pointes et pointes-ondes. Ces perturbations, obtenues avec un rayonnement pulsé de 3 GHz pour 5 mW/cm², ont été retrouvées avec la même densité de puissance en 2,45 GHz CW, et pour 0,7 mW/cm² avec un rayonnement pulsé de 9,4 GHz.

De nombreux auteurs ont mis en évidence des altérations de l'EEG⁶⁹ chez diverses espèces animales pour différentes modalités d'irradiation. Il a été mis en évidence un effet de la modulation transportée par le rayonnement. Nous-mêmes avons retrouvé⁷³ la fréquence de répétition des impulsions par analyse de fréquence de l'EEG. Les perturbations ne sont pas isolées, mais s'accompagnent de modifications des mouvements du calcium au niveau de l'encéphale¹²⁹.

Le SNC ne réagit pas seulement au niveau de l'EEG; il se produit aussi des modifications au niveau du comportement des animaux⁶⁹. Ce domaine est difficile à étudier; les chercheurs soviétiques⁶⁷, dans la lignée de Pavlov, ont consacré de nombreux travaux aux réflexes conditionnels dont l'apparition et l'extinction sont modifiés par l'irradiation.

Les nombreuses études consacrées à l'action des hyperfréquences sur le système nerveux central sont difficiles, d'autant plus que les observations faites mettent en évidence la résultante de nombreux processus dont plusieurs peuvent être perturbés par le champ électro-magnétique.

Un exemple en est donné par les réactions cardio-vasculaires à l'irradiation. La littérature^{32,130} est riche en variations de pression artérielle, de rythme cardiaque, etc... Il semble toutefois ressortir de ces travaux que la source en est au niveau du système neuro-végétatif dont le cœur et les vaisseaux sont des effecteurs privilégiés. Comme nous l'avons noté précédemment, il risque de se produire une stimulation douloureuse au niveau du système nerveux périphérique. Ce risque ne semble pourtant pas être très important au cours d'irradiations de longue durée, de plusieurs semaines à plusieurs mois, pour des densités de puissance faibles.

Il est impossible dans cette énumération de ne pas citer aussi les travaux qui montrent des modifications hormonales⁷², sanguines²², biochimiques, etc... Des changements dans certains rythmes biologiques⁷⁵ ont été observés, ainsi que des altérations des mitoses⁴¹.

Alors que la majorité des expériences sont conduites en irradiant des animaux entiers, il en existe qui utilisent d'autres sujets d'expériences, avec des résultats intéressants. Ainsi Webb^{113,114} a montré une absorption sélective de certaines fréquences très élevées, aux environs de 70 GHz, par des bactéries, avec une incidence sur la croissance. Ce travail vient du reste d'être récemment confirmé¹³¹.

Comme le montre cette longue énumération, les effets des champs hyperfréquences sont très divers. Ces effets ne sont obtenus, à quelques exceptions près, que pour des durées d'irradiation longues, dépassant le plus souvent la semaine et pouvant atteindre plusieurs mois.

Ainsi que nous l'avons déjà dit, en faire la synthèse est difficile. Nous pouvons cependant remarquer certains faits:

- tout d'abord, les perturbations causées par les hyperfréquences à bas niveau sont plus fonctionnelles qu'organiques, ou peut-être sont fonctionnelles avant d'être organiques;
- souvent, et nous l'avons remarqué au sujet de nos propres travaux mais aussi à propos d'autres résultats, les différences entre animaux irradiés et animaux non irradiés ne sont mises en évidence que par un facteur surajouté: l'irradiation modifie la manière dont l'animal réagit à un stress ou à un agent extérieur;
- enfin, les résultats expérimentaux sont attribués à l'action des hyperfréquences (ou "micro-ondes" ou autre synonyme); ces termes sont généraux et désignent tout un ensemble de rayonnements qui souvent diffèrent considérablement de l'un à l'autre; or il devient de plus en plus certain que les nombreux effets obtenus par une irradiation à bas niveau relèvent de plusieurs mécanismes différents, les uns liés à la fréquence porteuse, les autres à la modulation, etc...

Il est donc vraisemblable qu'une des raisons qui rendent si difficile la synthèse de ces effets réside dans le fait que l'on essaie de faire rentrer dans le même cadre des choses différentes. Pour essayer de schématiser cela, nous pourrions dire que certains effets sont dus aux hyperfréquences en général, ou peut-être même à une gamme de fréquence encore plus étendue, et pourraient être qualifiés d'effets "généraux"; une deuxième catégorie, liée à la fréquence porteuse n'apparaîtrait que dans une bande étroite; enfin, une troisième catégorie, dépendant de la modulation, pourrait se combiner avec les précédents en donnant éventuellement lieu à l'apparition d'une synergie ou d'une inhibition. Une telle représentation rend compte des oppositions apparentes par exemple entre un résultat obtenu avec un rayonnement de 3 GHz pulsé et un autre résultat obtenu avec un rayonnement de 9 GHz CW.

Cela suppose que l'énergie transportée par le champ électro-magnétique ne joue pas un rôle direct, comme cela est le cas pour l'effet thermique, mais intervienne en perturbant ou en orientant certains mécanismes vitaux au niveau de la cellule. Les recherches sur la cellule et ses mécanismes ont commencé dans une voie chimique. Depuis déjà plusieurs années, l'aspect physique de ces systèmes est étudié, mettant en évidence le rôle important joué par les

structures intra-cellulaires, en particulier les membranes, et par les phénomènes électriques qui se déroulent à leur niveau. Mais il reste encore beaucoup à découvrir, dans ce domaine, et il est possible que des mécanismes de transport de l'information, de cellule à cellule ou à l'intérieur d'une même cellule, soient plus sensibles qu'on ne l'envisage actuellement à une interaction des ondes électro-magnétiques. Cette interaction pourrait se manifester soit comme l'apport d'un bruit, soit comme l'apport d'une information nouvelle venant se surajouter dans le système. Dans ce dernier cas, la fréquence porteuse ne servirait qu'au transport de cette information jusqu'aux cellules. A la lumière des connaissances cybernétiques actuelles¹³², il est concevable que la quantité d'énergie nécessaire pour de telles interférences soit plus faible que pour une action directe.

D'autres tentatives d'explication sont aussi possibles, qui font appel à des théories plus classiques. Par exemple, la complexité des structures biologiques et les inhomogénéités du champ électro-magnétique qui en résultent peuvent donner naissance à des micro-échauffements qui seraient responsables des perturbations biologiques.

Il est évident que les connaissances dans ce domaine sont insuffisantes et qu'il reste beaucoup de travail à faire.

6. PATHOLOGIE HUMAINE

Nous venons de voir que les hyperfréquences peuvent pénétrer dans la matière vivante et interférer avec elle. En faisant d'importantes réserves et en nous limitant aux faits établis, nous pouvons prévoir que des faits analogues risquent de se produire chez l'homme placé en situation équivalente. Ceci est surtout valable dans le domaine thermique: les paramètres électriques et magnétiques des tissus humains diffèrent peu, en effet, de ceux des tissus animaux; un rayonnement hyperfréquence, pénétrant dans un organisme humain, donnera un échauffement dont il est possible, au moins approximativement, de prévoir les conséquences. Dans le domaine non-thermique nous devons être beaucoup plus prudents: comme il est pratiquement impossible d'utiliser l'homme comme sujet d'expérience, nos connaissances sont beaucoup moins étendues que chez l'animal, où elles sont déjà insuffisantes.

Nous pouvons donc nous attendre à retrouver chez l'homme les effets thermiques qui ont été mis en évidence chez l'animal, avec leurs conséquences: hyperthermie généralisée, lésions d'organes particulièrement sensibles, etc... Il faut tenir compte du fait que l'homme est en général libre de ses mouvements: s'il ressent une sensation de chaleur, il peut s'écarter du champ. Mais bien souvent, l'avertissement est tardif. Nous avons vu en effet que les microondes pénètrent, parfois profondément: si en bande X, aux environs de 10 GHz, l'absorption est quasi-totale dans les premiers millimètres de peau, en bande S ou L, pour des fréquences de 1 ou 2 GHz, la profondeur de pénétration est plus grande et peut atteindre plusieurs centimètres. La production de chaleur se fait donc dans les tissus profonds. Les corpuscules thermo-sensibles étant situés essentiellement dans la peau, ils ne seront mis en jeu que lorsque la chaleur produite dans les tissus sous-jacents aura diffusé vers la peau. Ceci est une différence majeure entre les hyperfréquences et tous les autres modes de chauffage. Il est donc possible que l'avertissement ne soit perçu qu'après que le rayonnement aura agi.

Un corps humain a aussi des dimensions généralement plus grandes que celles des animaux utilisés dans les laboratoires, alors que les longueurs d'ondes sont les mêmes. Cela nous conduit à envisager une autre possibilité: la formation d'ondes stationnaires à l'intérieur de certains organes, formation facilitée par le fait que, la fréquence du rayonnement ne variant pas, sa longueur d'onde diminue en raison de la diminution de célérité qui lui est imposée par les caractéristiques des milieux biologiques. Un rayonnement de 3 GHz, dont la longueur d'onde dans l'air est de 10 cm, peut ainsi la voir diminuer jusqu'à 2 cm. De tels systèmes d'ondes stationnaires peuvent entraîner la formation de points chauds, sources de brûlures internes.

Enfin, il est connu que, comme chez l'animal, le testicule et le cristallin sont particulièrement sensibles à la chaleur. Une élévation de température localisée à l'un de ces organes peut donc entraîner des lésions analogues à celles produites expérimentalement.

Après avoir vu les conséquences possibles d'une exposition à des densités de puissance élevées, nous devons évaluer les troubles qui se produisent réellement. Nous avons dit qu'il était impossible, pour des raisons évidentes, d'expérimenter directement sur l'homme. Il reste donc deux outils à la disposition des médecins, pour cette évaluation: l'étude de cas accidentels rapportés dans la littérature, et l'enquête épidémiologique.

La première méthode est la moins sûre. Le plus souvent, l'individu qui présente des signes cliniques attribués à une irradiation par radar n'a pas été l'objet d'une expertise préalable attestant de son bon état de santé. Il est donc rarement possible d'attribuer avec certitude l'origine des troubles au rayonnement, et l'on doit se contenter d'un doute "raisonnable" avec le risque d'erreur que cela implique par manque d'objectivité.

Nous pouvons citer le cas rapporté par McLaughlin¹³³: un technicien qui travaillait à environ 3 mètres d'une antenne perçoit une intolérable sensation de chaleur abdominale et s'écarte de l'endroit où il était; dans les heures qui suivent s'installe un tableau de péritonite et le sujet meurt onze jours plus tard malgré plusieurs interventions chirurgicales.

Le même auteur cite, mais sans donner aucun détail, deux cas d'infarctus hémorragiques de la rate après irradiation importante.

Rosenthal et Beering¹³⁴ rapportent le cas d'un homme jeune qui, après avoir subi plusieurs expositions importantes, a présenté une oligospermie avec infertilité alors qu'il avait déjà fait preuve de sa fécondité.

Pour notre part, nous avons vu le cas d'un ingénieur qui travaillait un matin sur un aérion parabolique émettant un rayonnement en bande X; quand il avait "trop chaud à la tête", il s'écartait du champ pour se refroidir. En fin d'après-midi, il a présenté des céphalées importantes puis un syndrome méningé suffisamment intense pour motiver une hospitalisation d'un mois.

Les cas de cataractes présentent les mêmes difficultés d'interprétation. Les sujets ont rarement subi un examen ophtalmologique antérieur. L'apparition d'opacités cristalliniennes chez un sujet exposé aux hyperfréquences peut donc toujours être attribuée soit à une coïncidence due au hasard, soit à l'irradiation elle-même. Dans ce domaine toutefois, les enquêtes comparant un groupe témoin et un groupe irradié sont possibles. Plusieurs ont été réalisées. Les résultats ne sont pas assez tranchés pour convaincre les sceptiques.

Pour nous résumer, la pathologie humaine due aux effets thermiques des hyperfréquences est très pauvre, et les cas cliniques très peu nombreux. Le cas de la cataracte se place à part, car, malgré les doutes que l'on peut élever, certains auteurs^{83,31} apportent des observations telles qu'elles doivent correspondre à une réalité.

Si nous envisageons maintenant les manifestations pathologiques attribuées aux effets spécifiques, nous nous retrouvons devant une situation analogue à celle des études expérimentales. Contrairement à la littérature occidentale, les revues soviétiques ont publié un grand nombre de cas de maladies professionnelles rencontrées chez des techniciens travaillant depuis longtemps dans les ambiances électro-magnétiques. Les signes cliniques sont multiples et relèvent aussi bien des glandes endocrines que des systèmes cardio-vasculaires ou nerveux. L'école soviétique¹²⁰ a décrit un syndrome des hyperfréquences qui regroupe ces divers signes. Le syndrome évolue en trois stades de gravité et se manifeste essentiellement par de l'asthénie, des céphalées, des troubles de la mémoire, des variations de tension artérielle.

Ce syndrome évoque une dystonie neuro-végétative, maladie très répandue de nos jours au point d'avoir été qualifiée de "maladie de la civilisation". Elle semble être un mode habituel de réponse de l'organisme humain aux nombreux stress que lui impose l'environnement moderne. Il faut toutefois noter que beaucoup de ses manifestations sont analogues à celles présentées par les animaux irradiés lors des expériences de longue durée.

Nous retrouvons là une des difficultés que nous avons mentionnées précédemment: l'organisme peut réagir de façon univoque à des agents différents; il devient donc très difficile d'attribuer à une cause précise parmi d'autres tel effet mis en évidence lors d'une étude.

Les enquêtes épidémiologiques peuvent être utiles. Mais comme nous l'avons déjà dit, leurs conclusions sont souvent opposées selon leur origine: alors que celles réalisées dans les pays de l'Est concluent à l'existence de troubles variés, les enquêtes réalisées dans les pays occidentaux aboutissent surtout à des résultats négatifs. Une telle disparité tient probablement à de nombreuses raisons, par exemple aux critères retenus pour la sélection initiale ou aux idées préalables qui ont fait décider de l'enquête. Il est possible que les enquêtes réalisées dans les pays occidentaux n'aient pas été orientées vers la mise en évidence des phénomènes décrits à l'Est. Les difficultés présentées par de telles études pourraient expliquer cet état de fait.

Un bon exemple en est donné par une enquête réalisée à Baltimore¹⁰⁹ sur le mongolisme. Cette enquête a mis incidemment en évidence qu'un plus grand nombre de pères d'enfants mongoliens avaient été exposés à une irradiation par radar, que de pères normaux. La différence était faible: 8,7% et 3,3%, et les populations interrogées n'avaient pas été sélectionnées en fonction de cet élément, le facteur étudié étant surtout les radiations ionisantes. Il est donc impossible actuellement de conclure avec certitude que le mongolisme est lié à une exposition du père aux champs électromagnétiques. Une nouvelle enquête, établie pour l'étude de ce facteur, devrait être réalisée pour trancher la question.

Dans la littérature occidentale, nous retrouvons néanmoins quelques éléments qui ressemblent à ceux décrits à l'Est. Ainsi Doury⁶² rapporte l'observation d'un homme ayant présenté un tableau clinique qui semble bien relever du syndrome des hyperfréquences des auteurs russes. Miro¹³⁵ a décrit une diminution de la résistance osmotique des hématies chez des personnels exposés professionnellement.

La majorité des signes imputés aux hyperfréquences sont subjectifs et donc difficiles à mettre en évidence; il est possible que nos méthodes passent à côté et ne soient pas très adaptées à ce problème. Il est très vraisemblable que de nouvelles études, appuyées par l'amélioration de nos connaissances, nous permettront de reconnaître et d'identifier les troubles que l'on doit craindre au cours d'expositions prolongées aux hyperfréquences. Il est quand même évident que, dans les conditions actuelles de travail, les accidents graves sont très rares.

7. STANDARDS DE SECURITE

Pour éviter ou limiter au maximum les accidents dus à des irradiations dangereuses, certains pays ou organismes ont élaboré des standards de sécurité. Les plus anciens proviennent des USA et d'URSS, par la suite, la même

démarche a été suivie par d'autres nations qui ont ainsi adopté des standards soit originaux, soit dérivés des systèmes américains ou soviétiques.

Ces systèmes s'appliquent aux hyperfréquences proprement dites, pour lesquelles des mesures directes de la densité de puissance sont possibles. Les fréquences en cause sont comprises entre deux limites qui varient légèrement d'un pays à l'autre: la borne inférieure est située entre 10 et 30 MHz, alors que la borne supérieure est placée entre 100 et 300 GHz.

Le système¹³⁶ le plus répandu dans les pays occidentaux est celui établi par Schwan et ses collaborateurs. Il est basé sur les possibilités qu'a le corps humain de dissiper l'extra-chaaleur produite par le rayonnement; il suppose donc qu'il n'existe que des effets thermiques. Ce système repose sur deux valeurs-seuil de la densité de puissance moyenne: 100 mW/cm² et 10 mW/cm². Toute exposition à une valeur supérieure à 100 mW/cm² est interdite. Entre 100 et 10 mW/cm², le temps d'exposition en minutes par période de une heure est calculé d'après la formule

$$t = \frac{6000}{P^2}$$

P étant la densité de puissance moyenne en mW/cm². En dessous de 10 mW/cm², il n'y a pas de restriction.

A de petites différences près, les mêmes valeurs ont été reprises par d'autres pays occidentaux tels que la France, le Canada, l'Allemagne Fédérale, etc...

Pour l'OTAN, l'adoption d'un standard analogue est en cours.

L'URSS a adopté un système très différent¹⁶ dont les valeurs limites sont très différentes. Toute exposition à une densité de puissance supérieure à 1 mW/cm² est interdite. Entre 0,1 et 1 mW/cm², un séjour de 15 à 20 minutes par journée de travail est autorisé, sous réserve du port de lunettes protectrices. Entre 0,1 et 0,01 mW/cm², l'exposition ne doit pas dépasser 2 heures par journée de travail. En dessous de 0,01 mW/cm², l'exposition peut être étendue à toute la durée de la journée de travail.

La Tchécoslovaquie³⁵ utilise un système plus complexe. Ce système établit une différence, d'une part entre champs continus (CW) et pulsés (PW), d'autre part entre technicien et personnel non spécialisé. Pour les techniciens, la densité de puissance maximale admissible pour un temps de travail de 8 h est fixée à 25 µW/cm² en CW, et à 10 µW/cm² en PW; pour des densités de puissance supérieure, le temps de séjour autorisé, en heures, est obtenu en divisant 200 (CW) ou 80 (PW) par la valeur de la densité de puissance exprimée en µW/cm². Dans le cas du personnel non spécialisé, les densités de puissance maximales admissibles sont divisées par 10, soit 2,5 µW/cm² (CW) et 1 µW/cm² (PW) mais le temps de séjour pour ces valeurs est porté à 24 heures. Dans le cas de densités de puissances supérieures, le temps de séjour est, de façon analogue, obtenu en divisant une constante par la valeur de la densité de puissance exprimée en µW/cm²; les constantes retenues sont alors de 60 pour les champs continus et de 24 pour les champs pulsés.

La Pologne⁸⁰ a adopté récemment un système différent. Il fixe une limite maximale pour la densité de puissance, soit 10 mW/cm², et une limite inférieure de 10 µW/cm² en dessous de laquelle la durée d'exposition n'est plus limitée. Pour les valeurs intermédiaires, la durée de l'exposition au champ en heures est calculée en divisant une constante par le carré de la densité de puissance exprimée en mW/cm²; en aucun cas la durée du séjour ne peut dépasser 8 heures. L'originalité du système vient de la distinction faite entre les champs stationnaires et ceux produits par un aérion tournant: dans le premier cas, la constante est fixée à 0,32, dans le second à 8. Les densités de puissance maximales autorisées pour une durée de 8 heures sont donc de 1 mW/cm² pour un champ mobile, et de 0,2 mW/cm² pour un champ fixe.

La comparaison (cf Fig.12) de ces divers standards de sécurité fait apparaître de façon évidente les différences qui existent entre eux. Nous avons vu que le système américain reposait sur des bases théoriques et expérimentales ne tenant compte que de la dissipation de chaleur. Les autres systèmes ont été établis à partir de constatations d'enquêtes épidémiologiques et de résultats expérimentaux, en tenant compte surtout des effets non-thermiques. Cette différence de conception au départ est certainement une des raisons qui expliquent les différences constatées. Une deuxième raison réside dans la philosophie des normes de sécurité en général: dans les pays occidentaux, les valeurs-limites sont établies pour éviter la production chez l'homme de troubles graves ou prolongés, avec un facteur de sécurité, et il est interdit de les dépasser; au contraire, dans les pays orientaux, les valeurs limites sont celles qui produisent les premiers troubles, même sans aucune gravité, et elles constituent un idéal auquel il faut essayer de se tenir.

Il est vraisemblable que d'autres raisons sont aussi responsables en partie de ces différences. Il est instructif de remarquer que les deux systèmes les plus anciens sont les plus différents. Le système tchèque, plus récent, est un peu plus élevé que le système soviétique. Le système polonais, dernier en date, est encore plus élevé. Inversement, aux Etats-Unis, le système recommandé par l'American National Standards Institute, bien que dérivé des normes précédentes, est plus strict. Il semble donc qu'il existe actuellement une tendance à une uniformisation des différents systèmes. De toutes façons, les connaissances sont encore insuffisantes pour que des certitudes puissent exister dans

ce domaine, et il sera nécessaire d'attendre encore quelque temps avant de pouvoir proposer des normes qui puissent être unanimement acceptées. Ces normes devront très probablement tenir compte non seulement de la densité de puissance moyenne et du temps d'exposition, mais aussi des autres paramètres du champ, tels que modulation, densité de puissance crête, etc...

Les standards dont nous venons de parler sont des normes d'exposition. Elles concernent les personnels, dans la plupart des cas militaires, la législation civile n'ayant suivi qu'avec un certain retard. Elles définissent les conditions dans lesquelles un individu peut être exposé à un champ hyperfréquence, sans préjuger des caractéristiques de l'appareillage qui produit ce champ.

Il ne faut pas les confondre avec les normes d'appareils, qui définissent ce que doit être un générateur, sans concerner le personnel.

Un tel système a été rendu nécessaire par la multiplication des générateurs à usage industriel ou commercial. Alors que les générateurs militaires sont construits pour envoyer un champ hyperfréquence en espace libre, les appareils industriels produisent le champ dans une cavité fermée. Il est alors possible de définir des valeurs maximales que les fuites ne doivent pas dépasser.

Aux USA, le Ministère de la Santé Publique a ainsi fixé les niveaux maximaux autorisés pour les appareils construits à partir d'Octobre 1971: lors de la vente du four, aucune fuite ne doit dépasser 1 mW/cm^2 , la mesure étant faite à cinq centimètres de la paroi; par la suite, aucune fuite ne doit dépasser 5 mW/cm^2 dans les mêmes conditions.

A notre connaissance, une telle réglementation n'a pas encore été prise dans d'autres pays, mais les constructeurs de fours à hyperfréquence fabriquent leurs appareils en fonction de ces valeurs.

Il est important d'avoir bien présente à l'esprit la différence qui existe entre normes d'exposition et normes d'appareils. Leurs applications sont totalement différentes, et leurs résultats aussi.

8. PROTECTION DU PERSONNEL

Vouloir protéger le personnel exposé aux hyperfréquences suppose qu'il puisse y avoir un danger. Nous avons vu que ces rayonnements pouvaient effectivement, dans certaines conditions, être dangereux par leurs effets thermiques. Dans le cas des effets non thermiques, les choses sont moins claires. L'existence d'un "effet biologique" ne signifie pas toujours que cet effet soit dangereux, et nous ne pourrions le savoir qu'en continuant les recherches pour mieux comprendre les mécanismes mis en jeu.

D'autre part, pour protéger le personnel, il faut savoir qui protéger³⁹. Il intervient ici une notion trop souvent méconnue: dans bien des cas, le personnel qui est irradié n'est pas professionnellement concerné par les hyperfréquences. Il en est ainsi sur les navires: leurs superstructures métalliques constituent de bonnes cages de Faraday qui protègent les radaristes dont les locaux sont à l'intérieur: par contre, les veilleurs à la passerelle, les marins qui travaillent sur le pont peuvent être exposés à des faisceaux radars sans le savoir. Il en est souvent de même sur les aérodromes où le personnel de piste ou les occupants de la tour de contrôle peuvent être dans le champ d'un des radars, soit accidentellement soit même volontairement quand ce radar est utilisé pour surveiller la circulation sur les pistes et routes. Il est donc très important, pour la protection et le contrôle, de ne pas se limiter au seul cas des spécialistes manipulant les générateurs.

Cette protection va pouvoir se faire par différents moyens⁴⁶. Tout d'abord, il faut déterminer les zones irradiées, c'est-à-dire, réaliser une cartographie des endroits exposés au rayonnement, en utilisant les ressources du calcul et des appareils de mesure. Il est alors possible parfois, de prendre quelques précautions qui permettent de réduire un risque collectif. Dans certains cas, cela est impossible et il devient nécessaire d'envisager une protection individuelle. De toutes façons, un contrôle médical est indispensable, qui permet une surveillance de l'état de santé des individus, une collecte de données très importantes pour une meilleure connaissance de l'influence de ces champs sur l'homme, et enfin une évaluation de l'imputabilité lors d'éventuels accidents.

La cartographie des zones irradiées est un problème théoriquement simple mais en pratique très difficile. Le calcul permet de prévoir les valeurs de la densité de puissance en différents endroits du faisceau. Mais les obstacles situés dans le voisinage de l'antenne peuvent modifier considérablement ces valeurs. Il en est de même lorsque plusieurs aériens sont proches. Le calcul devient alors très vite insuffisant. Il faut toujours le compléter par des mesures du champ, à l'aide d'un appareil indiquant la valeur de la densité de puissance. De tels appareils sont assez nombreux actuellement, et utilisent des solutions techniques diverses. Ils peuvent être fragiles et leur emploi est délicat: mal utilisés, ils risquent de donner des indications erronées, et peuvent même être détériorés par le champ qu'ils doivent mesurer. Il est donc préférable d'en réserver l'emploi à un technicien entraîné.

Les résultats donnés par les mesures demandent à être critiqués. Ils dépendent souvent du type de matériel utilisé: en effet, les hyperfréquences sont polarisées, et leur type de polarisation peut varier d'un émetteur à un autre. Pour un appareil donné, la réponse à un champ peut donc varier selon la sensibilité du capteur aux diverses

polarisations. Cette réponse peut varier aussi en fonction de la fréquence: il est difficile de réaliser un capteur qui soit identiquement sensible à toutes les fréquences dans une large gamme. Si, au rayonnement principal s'ajoutent une ou plusieurs réflexions, ou si un endroit reçoit plusieurs rayonnements différents, le résultat de la mesure peut être très douteux.

L'appareil de mesure idéal, qui devrait être bon marché, portable, insensible à la polarisation, à la fréquence, à la modulation, capable d'intégrer plusieurs rayonnements ou réflexions, etc..., est introuvable. Il existe depuis quelque temps des appareils qui s'en rapprochent.

Une autre approche du problème est relativement récente. Il s'agit de petits appareils plats, d'électronique simplifiée, portant une ampoule ou une diode LED qui s'allume quand le champ dépasse un certain seuil. De dimensions limitées, ces appareils peuvent facilement être portés dans une poche ou au revers. Malheureusement, ils nous semblent limités dans leurs applications. En effet, Beischer et ses collaborateurs¹³⁷ ont montré que la seule présence d'un individu dans un champ hyperfréquence le perturbait par création d'ondes stationnaires. Si ce phénomène n'est pas trop gênant pour le technicien équipé d'un appareil de mesure classique dont il peut déplacer la sonde, il nous semble rédhibitoire pour le badge. Par contre, un tel instrument peut être utile en atelier ou au laboratoire en l'utilisant en tant que balise fixe ou mobile. Incorporé à un panneau avertisseur, l'allumage de la lampe préviendrait de l'existence d'un champ. Un tel système aurait son utilité dans tous les cas où une zone quelconque est irradiée de façon irrégulière.

La détermination des valeurs du champ électro-magnétique dans les différentes régions fréquentées par le personnel peut montrer que, dans certaines zones, les valeurs dépassent les niveaux autorisés. Deux solutions sont alors possibles: interdire ou limiter l'accès, en fonction du niveau, ou réduire ce niveau. Dans le premier cas, il est nécessaire de baliser les endroits en cause: il est toujours préférable qu'un tel balisage soit normalisé. Le standard en préparation pour l'OTAN prévoit les caractéristiques auxquelles devront obéir les panneaux; ils seront vraisemblablement analogues à la figure n° 13. Si au contraire, on désire réduire la densité de puissance à un endroit donné, il est possible d'utiliser soit des panneaux de matériau absorbant, efficace mais cher et sujet à un vieillissement, soit des panneaux réfléchissants métalliques. Il est même possible de conserver la transparence des fenêtres en utilisant des matériaux spéciaux: il semble bien par exemple que le mylar métallisé donne de bons résultats.

Il est évident que ces précautions collectives sont utiles mais que leur première étape doit se situer lors de l'implantation des aériens, qu'il est préférable d'éloigner le plus possible des locaux occupés par du personnel.

Dans certains cas, il devient nécessaire qu'un individu pénètre dans une zone interdite ou reste dans une zone à temps de séjour limité. Il est alors théoriquement possible de le protéger en utilisant un vêtement protecteur. De tels vêtements sont à l'étude dans divers pays¹³², mais, à notre connaissance, les réalisations réellement utilisables sont rares. Il est en effet difficile de fabriquer un vêtement qui soit utilisable, donc souple, aéré, et permettant l'élimination de la chaleur dégagée par l'individu, qui protège, donc ne laissant pénétrer qu'une fraction du rayonnement incident quelle que soit sa direction, et qui conserve ses propriétés avec le temps, c'est-à-dire, résistant aux intempéries, aux manœuvres d'habillage et de déshabillage, etc... Enfin, au delà de certaines densités de puissance en régime pulsé, il risque de se former des arcs électriques entre les fils métalliques de la trame du tissu, ce qui le détériore. A l'heure actuelle, les vêtements protecteurs ne peuvent donc constituer qu'une solution exceptionnelle.

Bien que respectant les normes de sécurité et les précautions nécessaires, le personnel exposé aux champs hyperfréquences doit subir une surveillance médicale. Il est difficile de préconiser les examens qui doivent être ajoutés au contrôle habituel. Il faut éviter une surcharge qui sera inutile, coûteuse et gênante pour tout le monde, mais les résultats de cette surveillance apporteront des données cliniques précieuses pour une meilleure connaissance du risque.

La surveillance médicale doit être prudente: sans dissimuler quoi que ce soit aux personnels surveillés, il faut éviter de susciter chez eux l'apparition des signes recherchés comme c'est trop facilement le cas pour ces signes subjectifs. L'interrogatoire et l'examen général rechercheront particulièrement l'existence d'éléments de dystonie neurovégétative; une attention particulière sera portée au système cardio-vasculaire par mesure de la fréquence cardiaque, de la tension artérielle, éventuellement par enregistrement de l'électro-cardiogramme. Les examens de laboratoire comprendront une numération des éléments figurés du sang et, si possible une électrophorèse des protéines sériques. Un examen ophtalmologique contrôlera l'état du cristallin et de la rétine. Un enregistrement de l'électro-encéphalogramme, difficile souvent à pratiquer en routine, serait utile en complément.

Ces examens, pratiqués au commencement du travail en ambiance électro-magnétique, devront être répétés systématiquement une ou deux fois par an. En cas d'accidents dus à une irradiation exagérée, il sera utile de les répéter une fois par semaine pendant un ou deux mois; si le dépassement des normes ne s'accompagne pas de troubles cliniques, un examen devra être pratiqué le plus vite possible après l'exposition et répété une ou deux semaines après.

Un tel contrôle médical peut paraître surabondant, étant donné la faible importance de la pathologie imputable actuellement aux hyperfréquences. Rappelons qu'il est vraisemblable qu'une part de cette pathologie échappe aux moyens actuels de contrôle; par ailleurs, cela permettra de réunir un ensemble de données médicales qui complètera les résultats des expérimentations animales.

Une attention particulière doit être portée aux porteurs de prothèses. Certains *pace-makers*²¹ peuvent être perturbés par les microondes. La solution est du domaine technique et il est vraisemblable que, dans peu de temps, tous ces appareils jouiront d'une réelle immunité vis à vis des rayonnements. Actuellement, il en existe, en particulier du type "sentinelle", qui sont bloqués par le champ: dans ce cas, ils ne réagissent pas à une bradycardie ou un arrêt cardiaque, certains accidents en sont la preuve. En cas de doute, il est préférable que les porteurs de *pace-makers* ne subissent pas d'irradiation.

Un autre risque est lié à la présence de masses métalliques telles que pivots dentaires, broches osseuses, etc... Ces masses conductrices focalisent le champ électro-magnétique et il peut en résulter des lésions graves.

En règle générale, l'expérience prouve que, souvent, les accidents sont liés à une méconnaissance des risques, soit par défaut, soit par excès. Il est donc indispensable que tous les techniciens appelés à manipuler des hyperfréquences soient au courant des implications biologiques.

9. PROSPECTIVE

Le domaine des hyperfréquences est en perpétuel mouvement. Le radar proprement dit se développe toujours davantage en puissance et en nombre. La puissance de crête de certains radars transcontinentaux dépasse dix gigawatts alors que, inversement, les constructeurs fabriquent de petites unités pour équiper des bateaux, voire des voitures. En dehors de la détection proprement dite, les usages industriels se sont multipliés: réservés jadis au chauffage de certains matériaux tels que faïences, caoutchouc, etc..., ils se généralisent de plus en plus. Le Japon propose un appareillage pour la réfection des routes; l'International Microwave Power Institute étudie depuis plusieurs années la faisabilité d'un satellite captant l'énergie solaire pour la renvoyer sur la Terre sous forme de microondes.

En parallèle, la recherche biologique évolue aussi. Les premières études recherchaient les seuls effets nocifs. Maintenant, une partie des travaux essaie d'expliquer les mécanismes d'action des hyperfréquences sur la matière vivante, alors qu'une autre partie tente une utilisation bénéfique de ces rayonnements, selon des voies soit classiques comme les études sur le réchauffage de tissus conservés par cryogénie¹¹² ou sur la thérapie par hyperthermie⁷⁹, soit moins classiques comme les travaux de Priore et Pautrizel^{5,94}. Il est certain que ces recherches aboutiront dans un avenir plus ou moins proche. A ce moment là, la connaissance des mécanismes nous donnera des possibilités d'action sur la cellule qui sont encore difficiles à évaluer.

De façon plus immédiate, les hyperfréquences permettent en clinique la surveillance de certains paramètres biologiques¹³⁹ sans gêne pour le malade. La mesure de leur absorption peut donner des indications¹⁴⁰ qui seront précieuses dans certains diagnostics.

Remarquons pour terminer que les hyperfréquences ne sont qu'une partie des ondes hertziennes. Il est certain, bien que les données soient encore plus insuffisantes, que les ondes de fréquence inférieure⁹⁶ ont aussi une action biologique. Et il sera un jour nécessaire de réaliser une synthèse qui reliera les ondes électro-magnétiques et les champs électriques et magnétiques.

TABLEAU I

Energie de Divers Rayonnements Electro-magnétiques

<i>Longueur d'onde</i>	<i>Fréquence</i>	<i>Energie (eV)</i>
5 km	60 kHz (BF)	$2,5 \times 10^{-10}$
50 m	6 MHz (HF)	$2,5 \times 10^{-8}$
50 cm	600 MHz (UHF)	$2,5 \times 10^{-6}$
5 cm	6 GHz (SHF)	$2,5 \times 10^{-5}$
5 mm	60 GHz (EHF)	$2,5 \times 10^{-4}$
200 μ	$1,5 \times 10^{12}$ Hz (IR)	$6,2 \times 10^{-3}$
0,35 μ	$8,6 \times 10^{14}$ Hz (UV)	3,6
0,1 μ	3×10^{15} Hz (UV)	12,4
10 Å	3×10^{17} Hz (X)	1240
0,001 Å	3×10^{21} Hz (γ)	$1,24 \times 10^7$

TABLEAU II

Distance de Rayleigh en Fonction de l'Ouverture de l'Aérien (D) et de la Longueur d'Onde (λ)

λ \ D	30 cm	1 m	10 m
20 cm	22,5 cm	2,5 m	250 m
10 cm	45 cm	5 m	500 m
3 cm	1,5 m	16,7 m	1,7 km
1 cm	4,5 m	50 m	5 km

TABLEAU III

Gamme de Fréquences Radio-électriques

30 kHz	300 kHz	3 MHz	30 MHz	300 MHz	3 GHz	30 GHz	Fréquences
VLF	BF	MF	HF	VHF	UHF	SHF	EHF
10 km	1 km	100 m	10 m	1 m	10 cm	1 cm	Longueur d'ondes
							Micro-ondes

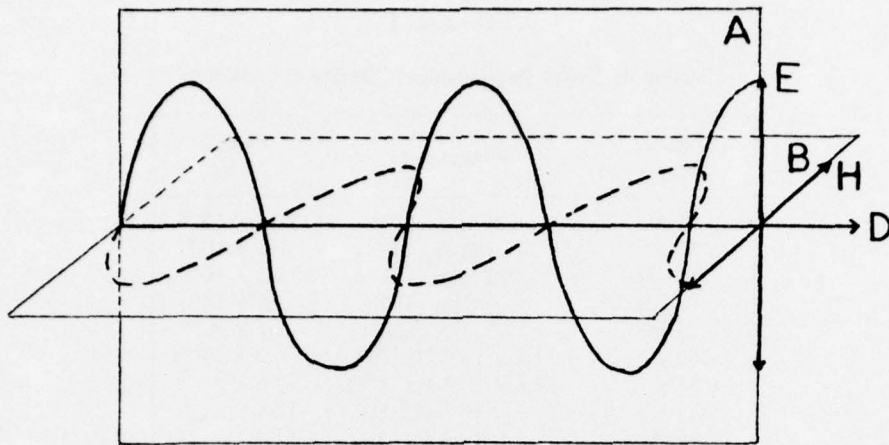


Fig.1 Onde électro-magnétique. Elle est formée d'un champ électrique E et d'un champ magnétique H , en phase, orthogonaux entre eux et avec la direction de propagation D

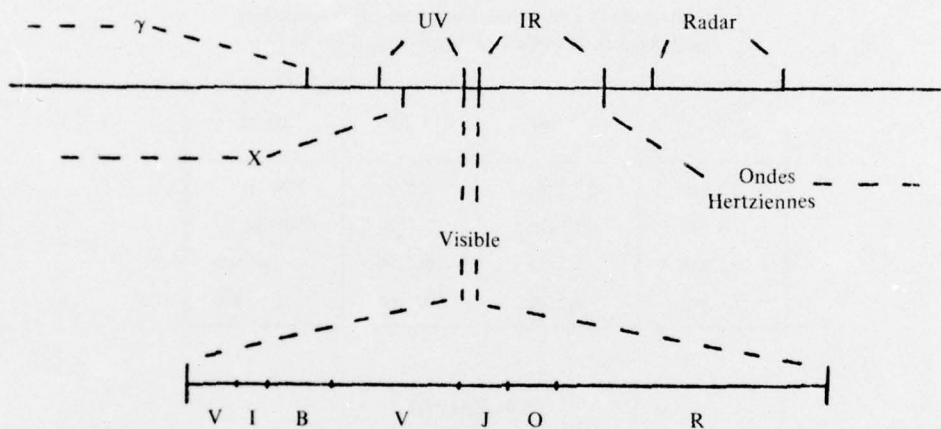


Fig.2 Spectre électro-magnétique

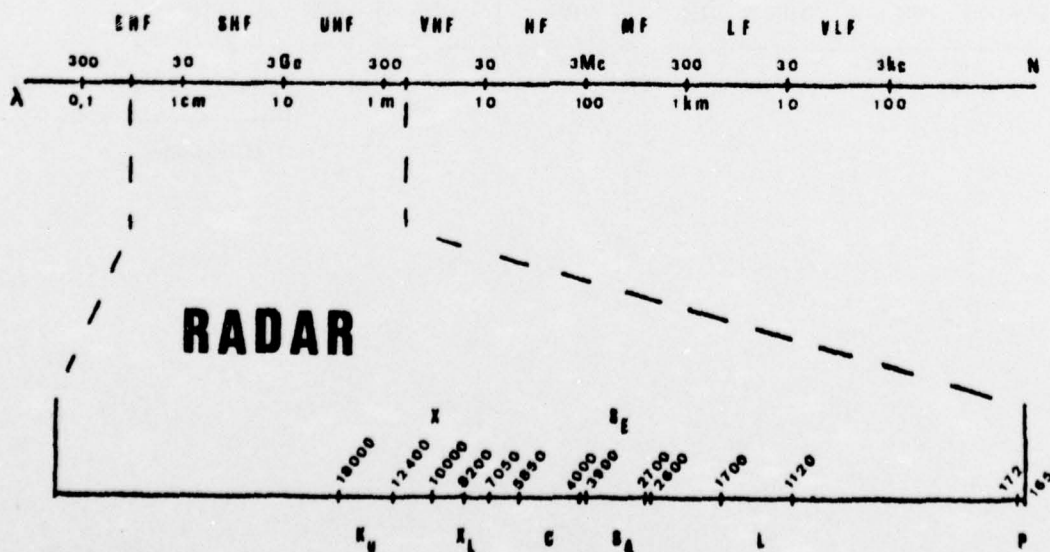


Fig.3 Gammes d'ondes hertziennes

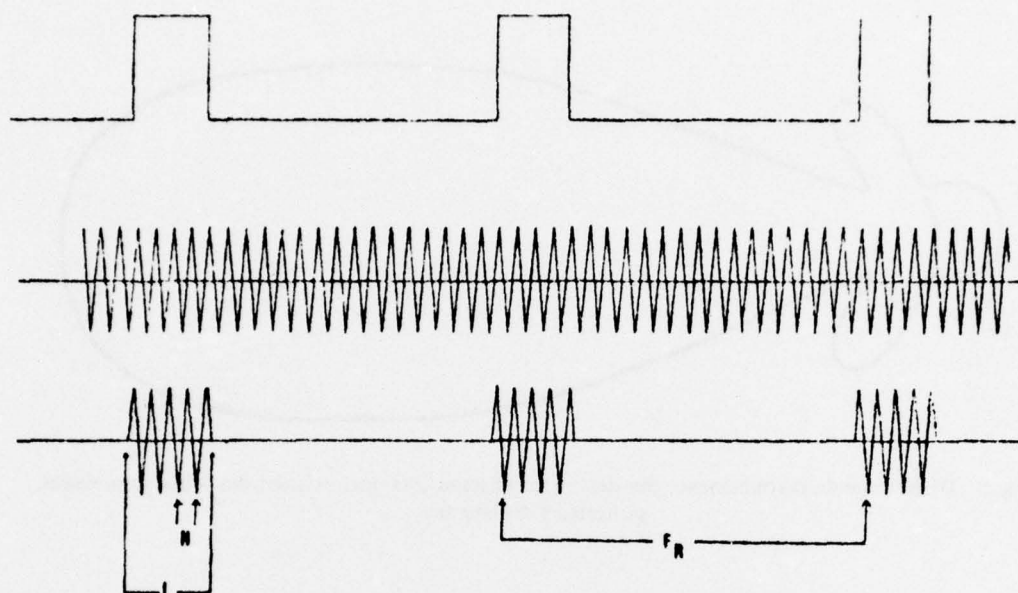


Fig.4 Modulation par impulsions. La modulation (tracé du haut) est imposée à la fréquence porteuse (tracé du milieu). N = hyperfréquence; t = durée de l'impulsion; f_R = fréquence de répétition



Fig.5 Puissance de crête et puissance moyenne

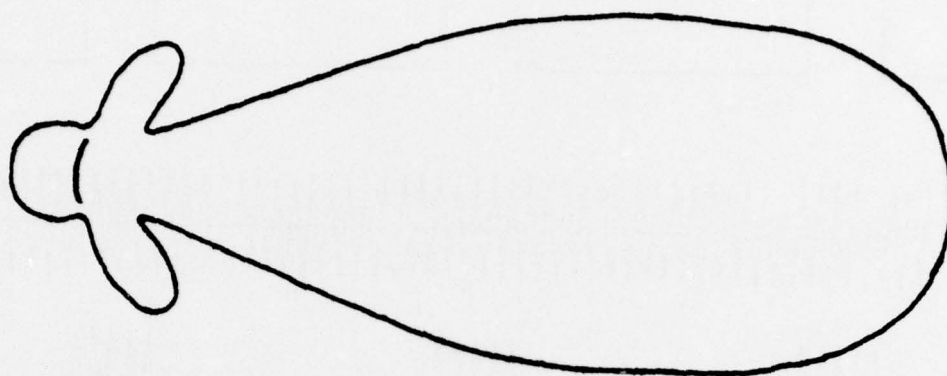


Fig.6 Diagramme de rayonnement. En dehors du faisceau principal existent des lobes secondaires, postérieurs ou latéraux

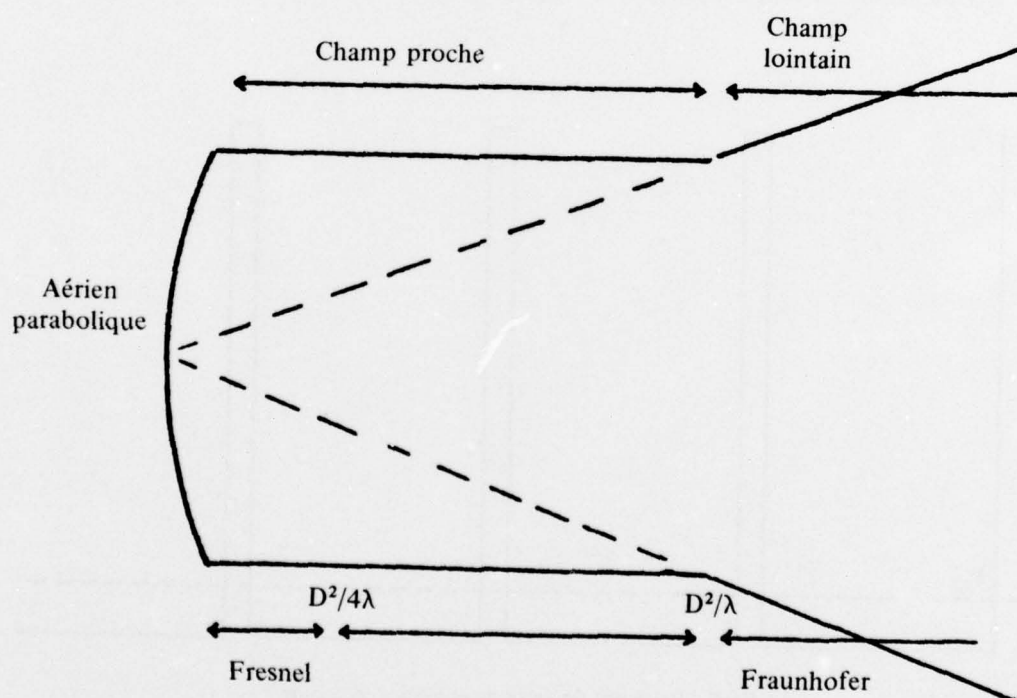
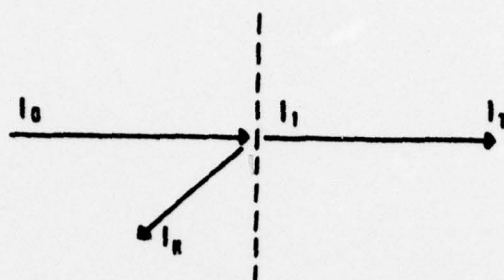


Fig.7 Constitution du faisceau. Le champ électro-magnétique n'est vraiment formé que dans le champ lointain, correspondant à la zone de Fraunhofer. La zone de Fresnel et la zone intermédiaire correspondent au champ proche



$$I_1 = I_0(1 - r)$$

r = coef. réflexion

$$I_R = I_0 r$$

D = prof. pénétration

$$I_T = I_1 e^{-\frac{x}{D}} = I_1 e^{-2\alpha x}$$

α = coef. absorption

Fig.8 Réflexion sur une interface. I_0 = rayonnement incident; I_r = rayonnement réfléchi;
 I_t = rayonnement transmis

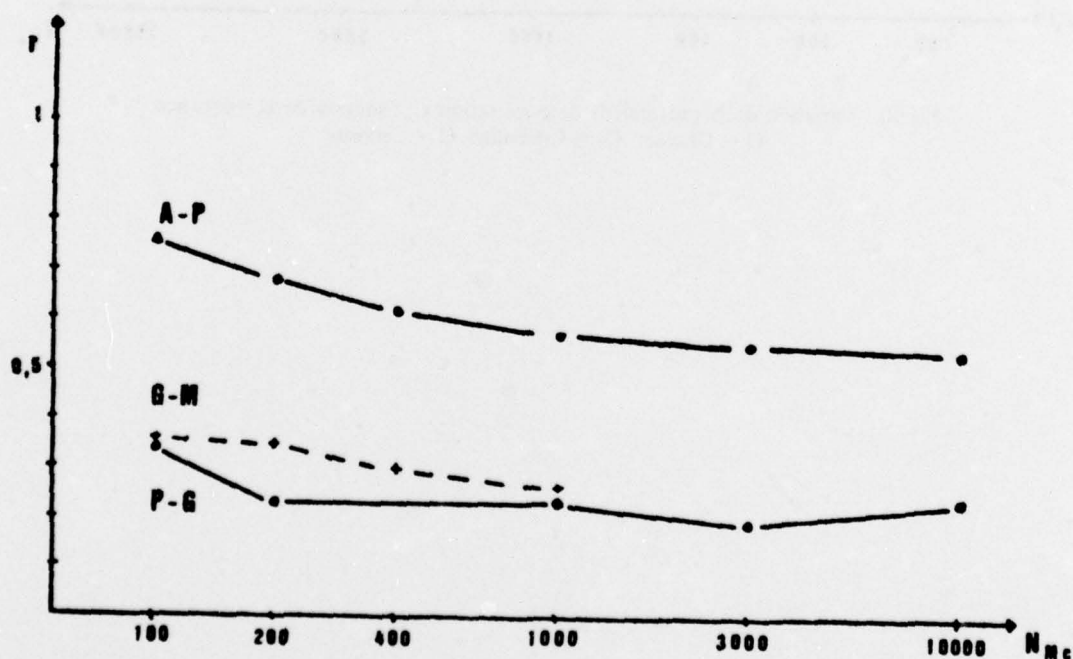


Fig.9 Variation du coefficient de réflexion en fonction de la fréquence. A-P = interface air-peau;
P-G = interface peau-graisse; G-M = interface graisse-muscle

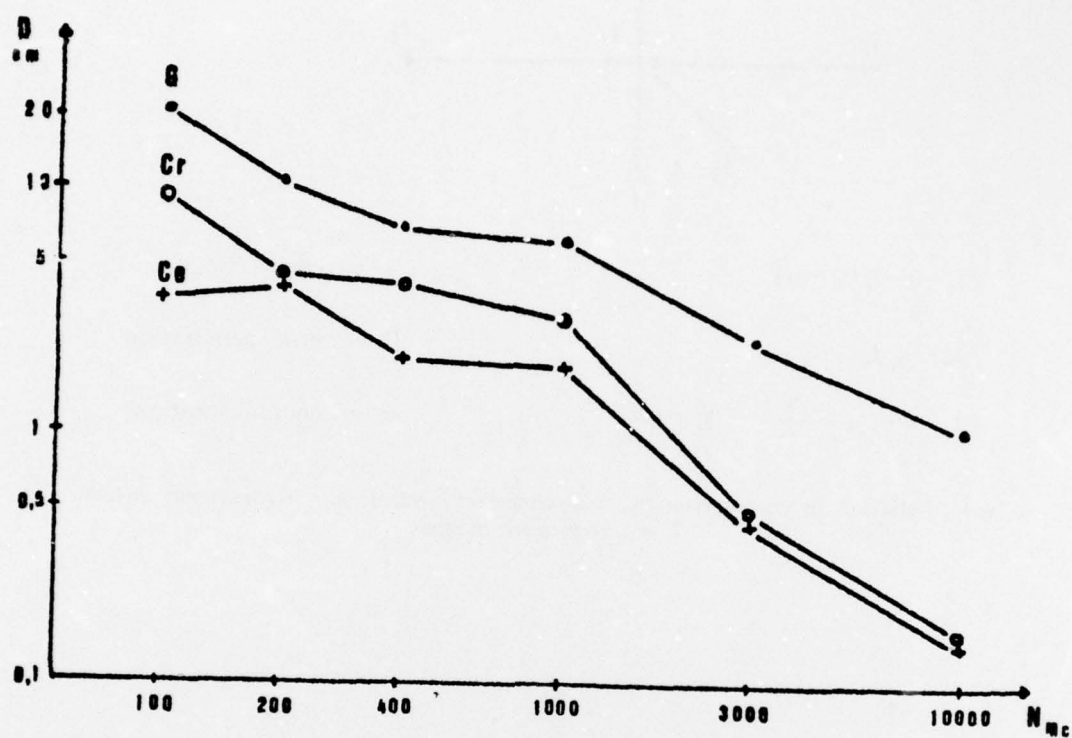
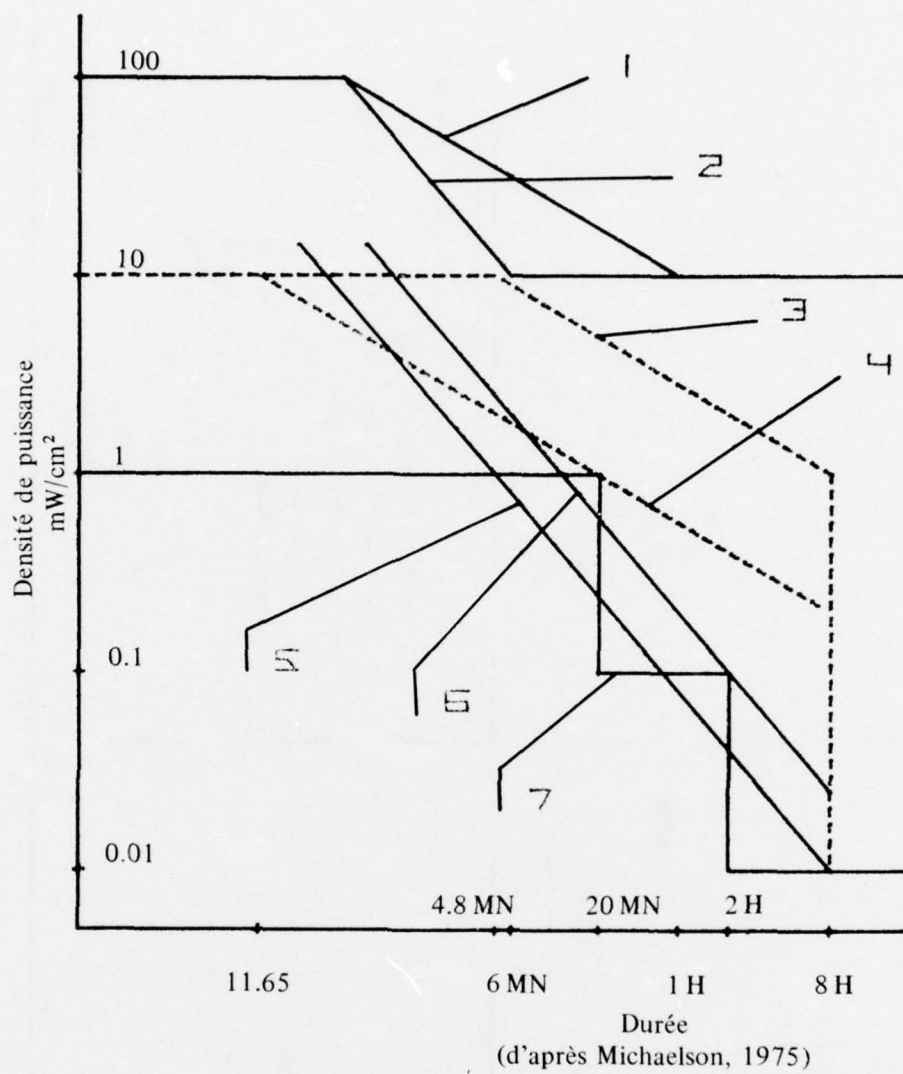


Fig.10 Variation de la profondeur de pénétration en fonction de la fréquence.
G = Graisse; Cr = Cristallin; C = Cerveau



- | | |
|-------------------------------|-----------------------------------|
| 1. Système militaire U.S. | 2. ANSI |
| 3. Pologne (champs tournants) | 4. Pologne (champs stationnaires) |
| 5. Tchécoslovaquie (PW) | 6. Tchécoslovaquie (CW) |
| 7. URSS | |

Fig.12 Comparaison des divers systèmes de normes

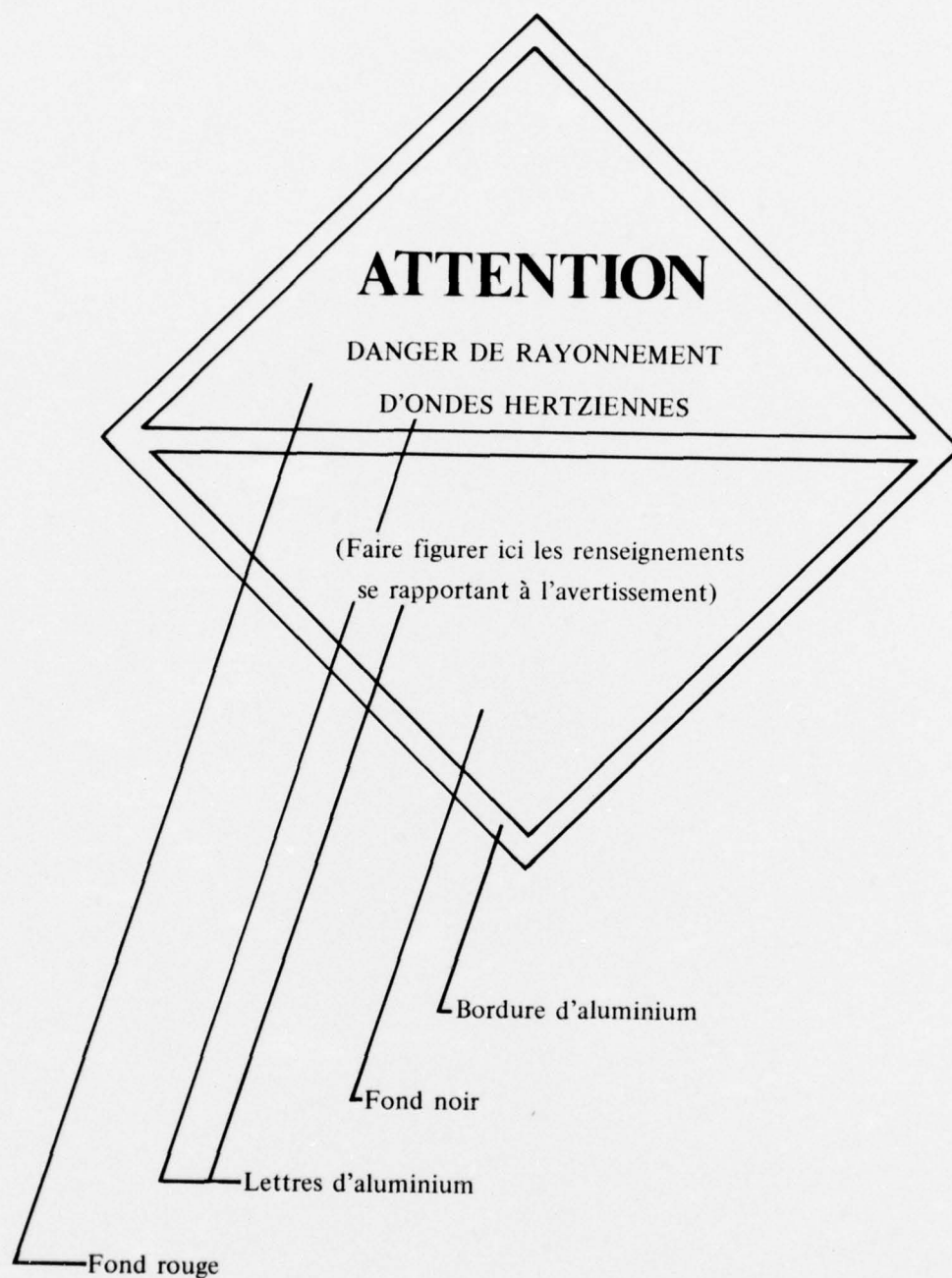


Fig.13 Projet de panneau avertisseur

PRECEDING PAGE BLANK NOT FILMED

LES LASERS – ASPECTS MEDICAUX ET PROBLEMES DE SECURITE

par

W.Schwarzer, MD
53 Bonn (RFA)
Sanitätsamt der Bundeswehr
Platanenweg

1. INTRODUCTION

Le "laser" – sigle représentant l'expression "Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation" (Amplification de la Lumière par Emission Stimulée de Radiations) – est un maser optique. Il convertit la lumière ordinaire, de fréquences et de longueurs d'ondes diverses, en rayons lumineux cohérents et monochromatiques. On peut réaliser des lasers sur toute la gamme du spectre, c'est-à-dire dans la zone des infrarouges, la zone visible et celle des ultraviolets. Les rayons obtenus sont extrêmement intenses. Ils peuvent être concentrés par des dispositifs optiques; la collimation est alors suffisamment forte pour permettre d'obtenir des rayons de 1 à 2 microns de diamètre. L'exemple suivant est une parfaite illustration de ce que représente en fait cette possibilité: une hématie, ou globule rouge du sang, a un diamètre moyen de 7,6 microns. Or, on peut concentrer un rayon laser au point de lui permettre de perforer une hématie, la transformant en corps annulaire.

Lorsque C.H.Townes prédit le développement des masers optiques à partir des techniques maser, en 1958, et lorsque T.H.Maiman inventa le premier laser pulsé (laser à rubis) en 1960, personne n'aurait soupçonné l'importance que prendrait cette invention quinze ans seulement plus tard. On peut comparer l'impact de cette découverte révolutionnaire à celui du tube à électrons, comme l'a prouvé le développement spectaculaire d'une branche de l'industrie entièrement nouvelle.

Suivant leur mode de fonctionnement, nous divisons les lasers en deux catégories: lasers pulsés et lasers continus. Il y a seulement quelques années, la puissance et le rendement des lasers étaient encore relativement faibles. A l'heure actuelle, laboratoires et firmes industrielles utilisent des lasers solides, à gaz et liquides dont la gamme de puissance va du milliwatt au gigawatt (laser pulsé) et dont le rendement ne cesse d'augmenter. On trouve également sur le marché, pour des applications industrielles, des lasers à CO_2 continus, dont la puissance varie de 250 à plusieurs milliers de watts et le rendement de 15 à 25%. Dans certaines conditions, le rendement du laser à CO_2 peut atteindre 33%. En outre, les dispositifs nécessaires à l'alimentation en énergie des lasers sont maintenant plus petits et plus maniables que les équipements lourds et encombrants utilisés auparavant.

Les lasers sont maintenant largement utilisés à des fins militaires; citons la télémétrie, les simulateurs de tir, les instruments de contrôle et de guidage, les dispositifs de pointage et de direction du tir, les calculatrices, les systèmes de communication, etc. Au cours de la guerre du Viet-Nam, les Américains ont eu recours au laser qui leur a donné des résultats extrêmement satisfaisants.

On met actuellement au point des lasers d'une puissance extraordinaire, destinés à des applications techniques aussi bien que militaires. Des lasers à CO_2 d'une puissance de plusieurs centaines de kilowatts ne sont plus considérés comme des réalisations surprenantes.

Du fait de cette évolution, l'introduction de lasers à puissance élevée en tant qu'armes à radiations semble maintenant possible. Considérées, il y a seulement quelques années comme de fantastiques objets de science fiction, ces armes sont maintenant devenues techniquement faisables. Si elle n'apparaît guère réalisable en partant du laser à CO_2 , l'arme à radiations pourrait être obtenue grâce à d'écents développements tels que le laser à acide fluorhydrique et, surtout, le laser à iode. L'importance de cette arme serait énorme, en particulier pour la défense contre les avions et missiles évoluant à basse altitude, puisqu'elle permettrait un transport d'énergie vers la cible à la vitesse de la lumière, alors que, même dans l'avenir, la vitesse des projectiles d'armes conventionnelles ou des missiles dépassera à peine 2000 m/sec.

Les niveaux d'énergie lumineuse que permettent d'obtenir les lasers sont de plusieurs milliers de fois supérieurs à l'énergie solaire atteignant la surface de la terre, par cm^2 . Le rayon concentré d'un laser pourrait provoquer l'évaporation de tout élément connu. On espère pouvoir l'utiliser un jour pour le déclenchement de la fusion nucléaire.

Pour les références, voir la page 85 du texte anglais.

Il est évident que des sources lumineuses extrêmement intenses telles que celles-ci sont très dangereuses pour les substances biologiques. En tant qu'organe des sens, l'œil est particulièrement sensible aux dangers des radiations lumineuses. Dans plusieurs cas, ces sources lumineuses ont provoqué des lésions oculaires et même la cécité. L'exposition de la peau, c'est-à-dire de la surface du corps, est également un facteur important. Il faut uniquement attribuer à la chance le fait que, jusqu'ici, les accidents survenus n'aient provoqué que des brûlures du deuxième degré. La très haute intensité des impulsions de certains lasers à déclenchement ("Q switched lasers"), ainsi que des lasers à CO_2 pourrait créer des lésions graves de la peau et des organes internes. Il importe donc au premier chef de procéder à des études détaillées des effets pathologiques des rayons laser sur les animaux et de déterminer les lésions seuil pouvant servir de base à l'établissement de règles de sécurité pour le maniement des dispositifs à laser. Dans ce contexte, c'est aux lésions oculaires que l'on doit accorder une importance primordiale, puisque les énergies lumineuses qui n'offrent pas de dangers pour l'œil sont sans effets pour le reste du corps. Pour comprendre le processus suivant lequel les lasers provoquent des lésions oculaires, il est indispensable d'étudier celles qui ont été causées par des sources lumineuses d'intensité élevée assez connues et d'identifier les facteurs soit communs soit différents des mécanismes lésionnels impliqués.

2. NOTIONS FONDAMENTALES SUR LE LASER ET SON PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT

La lumière ne constitue qu'une faible partie de la gamme étendue de radiations électromagnétiques visible pour l'organe sensoriel appelé "œil". Maxwell fut le premier à démontrer, en 1873, que la lumière consistait en radiations électromagnétiques. Sa vitesse de propagation dans le vide est de 3×10^8 m/sec. Selon Einstein, la vitesse de la lumière est constante dans tout l'univers. En vertu de la théorie des quanta, les radiations électromagnétiques doivent être considérées comme des radiations corpusculaires dont le plus petit quantum indivisible est le photon. La quantité d'énergie est déterminée par l'équation suivant: $E = \nu \cdot h$, ν étant la fréquence de rayonnement et h la constante de Planck. La relation entre la fréquence, la longueur d'onde et la vitesse de la lumière est définie par l'équation $c = \nu \cdot \lambda$, c étant la vitesse de la lumière et λ la longueur d'onde.

Une émission de radiations électromagnétiques, et par conséquent de lumière, se produit toujours lorsqu'une particule chargée, telle qu'un électron, libère de l'énergie vers un champ électrique. C'est le cas lorsque, à l'intérieur d'une molécule, d'un atome ou d'un ion, un électron tombe d'un niveau d'énergie supérieur à un niveau inférieur. Pour les sources lumineuses courantes, il s'agit là d'un processus fortuit. Il n'en est pas de même pour les lasers, où ces transitions sont stimulées par les photons et où les émissions ont la même longueur d'onde, la même phase et la même direction. Pour descendre à un niveau d'énergie inférieur et libérer simultanément de l'énergie de rayonnement sous forme de photons, les électrons doivent tout d'abord être portés à un niveau d'énergie supérieur. Il existe diverses méthodes pour obtenir ce résultat: on peut avoir recours à la chaleur, comme dans le cas des ampoules électriques, à l'absorption de photons, comme dans le cas des peintures lumineuses, aux réactions chimiques, comme dans une flamme, ou aux collisions avec d'autres électrons. En ce qui concerne les lasers, les électrons, dans un matériau approprié, subissent une transition qui les fait passer à un état métastable d'énergie supérieure. Simultanément, une inversion de la population électrons est opérée, c'est-à-dire que, contrairement à ce qui se passe à l'état normal, le nombre d'électrons à un niveau d'énergie supérieur dépasse, celui d'un niveau d'énergie inférieur. Si quelques électrons passent d'un niveau métastable supérieur à un niveau d'énergie inférieur, d'autres électrons sont stimulés par les photons libérés au cours de ce processus, et l'on obtient une réaction en chaîne.

Un laser est essentiellement composé de trois éléments de base nécessaires à la production de rayons laser:

- (1) Un matériau support,
- (2) Un système de pompage permettant d'amener les électrons sur un niveau d'énergie supérieur.
- (3) Une cavité de résonance.

Tous les autres éléments optiques tels que lentilles, miroirs, etc. n'ont qu'une importance secondaire. Leur fonction consiste à produire des impulsions plus courtes ou à augmenter le rendement énergétique, ou encore à concentrer les rayons.

Le matériau support doit au moins présenter le niveau d'énergie nécessaire à l'obtention, par stimulation, d'un état métastable auquel on peut faire accéder les électrons et d'où ils ne retomberont pas immédiatement d'eux-mêmes. Ils doivent au contraire demeurer à ce niveau métastable pour une durée variant de quelques microsecondes à plusieurs millisecondes. Avec une énergie de pompage appropriée, on doit avoir une inversion de la population d'électrons à ce niveau métastable, c'est-à-dire que le nombre d'électrons au niveau supérieur, d'énergie accrue, doit dépasser celui du niveau inférieur, de moindre énergie. Les électrons demeurent à ce niveau jusqu'à l'apparition d'une émission stimulée. Le fonctionnement en laser est déjà possible pour les matériaux possédant deux niveaux d'énergie, mais la plupart des lasers fonctionnent avec 4 niveaux ou davantage. Dans la majorité des cas, les lasers sont désignés suivant le type de matériaux support employé. Les matériaux utilisés sont les suivants: cristaux ou verre (lasers solides), gaz ou mélanges gazeux (lasers à gaz), matériau à transistor (lasers à semiconducteurs) et matériau actif dissous dans un liquide ou en suspension (lasers liquides).

Les électrons sont amenés sur un niveau supérieur grâce à un système de pompage: pour ce faire, on a recours à plusieurs procédés. Les pompes optiques utilisent une source lumineuse de forte intensité, comme un tube éclair au xénon, ou même au autre laser: dans le cas d'un pompage faisant appel à une collision d'électrons, on envoie un courant électrique à travers le matériau laser ou l'on bombarde ce dernier à l'aide d'électrons accélérés. Dans le pompage chimique, des réactions chimiques donnent lieu à une libération d'énergie. Dans le cas des lasers solides et

liquides, le pompage s'effectue essentiellement grâce à des moyens optiques, alors que pour le pompage des lasers à gaz, on utilise des collisions d'électrons. Certains types de lasers liquides ou à gaz font appel à un pompage chimique. Le pompage utilisé pour les lasers à semi-conducteurs peut être optique ou effectué à l'aide de collisions d'électrons.

La cavité de résonance a pour importante fonction de prolonger le séjour des photons dans le matériau. Une méthode simple pour obtenir cette prolongation consiste à fixer des miroirs aux extrémités du matériau laser; les photons quittant ce matériau sont alors reflétés par les miroirs, et ce faisceau est renvoyé vers le matériau laser. Les photons passent de nombreuses fois à travers le matériau intensifiant ainsi le faisceau de photons. L'un des miroirs fixés à l'extrémité du matériau possède un pouvoir de transmission partielle et permet à certaines portions du rayon lumineux de sortir de la cavité de résonance.

Les lasers diffèrent entre eux par leur mode de fonctionnement, c'est-à-dire, suivant la façon dont est fournie l'énergie par unité de temps. On a déjà mentionné la différence entre les lasers pulsés et les lasers continus. En règle générale, la durée d'impulsion des lasers pulsés varie de quelques millisecondes à quelques fractions de microseconde. Dans le cas des lasers à déclenchement, la durée d'impulsion se range dans la gamme des nanosecondes (10^{-9} secondes); quant aux lasers pulsés à mode bloqué, la durée d'impulsion est de l'ordre de la picoseconde (10^{-12} secondes).

Le laser pulsé à rubis classique et son mode de fonctionnement sont brièvement décrits ci-dessous. Dans le cas de ce laser, l'émission stimulée de lumière se fait à l'intérieur d'un cristal de rubis qui se présente sous forme d'une fine baguette cylindrique dont les extrémités parallèles sont recouvertes d'argent dans le but d'obtenir une réflexion spéculaire. Un rubis est composé d'oxyde d'aluminium cristallisé dans lequel certains des atomes d'aluminium sont remplacés par des chromates. Grâce à la lumière d'un tube éclair les quanta de ces chromates sont portés à un niveau d'énergie supérieur, et le retour à leur état original s'accompagne d'une émission de photons d'une longueur d'onde de 694,3nm. Ces photons, émis le long de l'axe du cristal, passent de l'un des plans recouverts d'un enduit réfléchissant à l'autre, en vertu de la réflexion interne du cristal. Simultanément, ils provoquent le retour prématuré d'autres atomes de chrome stimulés à leur état énergétique original, ce retour s'effectuant avec émission de lumière. Par ce processus se trouve stimulée une onde lumineuse qui se déplace dans une seule direction après être issue du plan d'émission du cristal, c'est-à-dire de l'extrémité partiellement recouverte d'un enduit réfléchissant; cette onde lumineuse est extrêmement intense, monochromatique et cohérente.

3. PHOTOTRAUMATISMES PROVOQUES PAR LA LUMIERE SOLAIRE (Photoretinite solaire, brûlures dues aux éclipses)

C'est un fait reconnu depuis l'antiquité qu'une observation prolongée du soleil peut provoquer des perturbations visuelles. Selon Platon, Socrate recommandait de n'observer d'une éclipse solaire que son image reflétée par une surface liquide. Galien connaissait les lésions oculaires entraînées par l'exposition solaire. A force d'observer le globe solaire au télescope, Galilée souffrit de troubles oculaires.

La littérature médicale fait largement état de ce type de lésion. Dans la plupart des cas, on se sert, pour observer une éclipse solaire, d'un verre insuffisamment noirci. Pendant la durée d'une éclipse règne une lumière crépusculaire qui peut facilement nous induire à sous-estimer l'intensité des radiations solaires. En outre, dans des conditions de luminosité crépusculaire, le degré de dilatation de la pupille est plus élevé qu'à la lumière du jour. On observe parfois les éclipses à travers des verres fumés qui laissent pratiquement passer toutes les radiations infrarouges. Comme l'observateur n'éprouve pas de sensation subjective d'aveuglement, il peut facilement être victime de graves détériorations de la rétine. Les lésions oculaires ainsi provoquées dépendent de l'intensité lumineuse et de la durée d'exposition. Dans les cas bénins, l'aveuglement survient en même temps qu'une remanence de l'image pendant un temps plus ou moins long. Dans le champ visuel, peuvent apparaître des scotomes subsistant parfois plusieurs jours ou plusieurs semaines. Ils sont même susceptibles de revêtir un caractère permanent; ils peuvent s'accompagner d'une perte de l'activité visuelle centrale. Des lésions ophtalmologiquement évidentes du fond d'oeil, comme un oedème de la rétine, etc. n'apparaissent pas dans tous les cas (rétinite solaire). Lors de traumatismes graves, il existe des signes objectifs de nécrose du tissu rétinien par photocoagulation. Il s'agit de brûlures provoquées par des rayons visibles ou infrarouges, qui sont concentrés par le système optique de l'oeil sur une zone réduite située dans la fovea de la rétine.

De nombreux observateurs utilisant les deux yeux pour observer une éclipse solaire, ce sont très souvent les deux yeux qui subissent des détériorations. Selon Birch-Hirschfeld, la gravité du traumatisme est déterminée, entre autres, par des facteurs individuels; on rapporte également qu'elle varie avec le degré de pigmentation du sujet. Toutefois ces observations ne sont pas confirmées de façon générale. D'autre part, la réfraction des yeux joue un rôle important dans l'apparition d'une lésion. Un sujet emmétrope ou légèrement hypermétrope accommodera avec plus de précision qu'un sujet affecté d'un vice de réfraction plus marqué et non corrigé. Pour cette raison, les lésions seront plus fréquentes chez les individus appartenant à la première catégorie. Il est évident que cette différence n'intervient plus à partir du moment où le vice de réfraction aura été corrigé. Les phototraumatismes sont plus fréquents chez des sujets jeunes, dont le cristallin est plus transparent, que chez des sujets âgés. D'autre part, l'oeil aphaque est beaucoup plus vulnérable aux phototraumatismes que l'oeil normal.

Dans des conditions normales, l'observation du soleil n'entraîne aucune lésion oculaire car la durée du regard est beaucoup trop courte. Cependant, lorsque nous observons une éclipse du soleil, nous regardons attentivement le globe solaire et supprimons consciemment le réflexe du clignement. Regarder le soleil pendant une seule minute peut suffire pour provoquer une lésion du fond d'oeil. A la surface de la terre, l'intensité des radiations solaires est d'environ $0,1 \text{ W.cm}^{-2}$. L'angle que forme l'astre solaire par rapport à la Terre varie: en Janvier, il est de 32 minutes 36 secondes ou $9,48 \text{ mradian}$; en Juillet, de 31 minutes 31 secondes ou $9,17 \text{ mradian}$, ce qui correspondrait respectivement à des images rétinienne de 161 et 156 microns. Lorsqu'un sujet observe directement le soleil, sa pupille se contracte fortement jusqu'à présenter un diamètre d'approximativement 2 mm; dans ce cas, 3% environ de l'énergie de rayonnement solaire mentionnée plus haut pénètre dans l'oeil. En supposant que l'on ait alors une image rétinienne de 160 microns, ce point sera exposé à une intensité lumineuse d'environ 16 W.cm^{-2} si la totalité de l'énergie lumineuse qui pénètre dans l'oeil atteint la rétine. En admettant même que 30% de cette énergie se dissipe au cours de son trajet à travers les milieux oculaires, nous avons $10 \text{ à } 11 \text{ W.cm}^{-2}$. Cette quantité d'énergie est encore suffisante pour causer vite des brûlures rétinienne graves. Selon Verhoeff et Bell, la 26^e partie de cette quantité d'énergie suffit à produire des brûlures rétinienne chez le lapin. En dehors de l'atmosphère terrestre, le risque de lésions rétinienne s'accroît considérablement; en effet, l'intensité du rayonnement solaire est alors d'environ 50% plus forte qu'à la surface de la Terre (Strughold et coll.).

Des phototraumatismes des yeux surviennent fréquemment lorsque l'observation prolongée de l'astre solaire constitue une pratique courante, ainsi au cours de rites de certaines sectes religieuses comme les adorateurs du soleil. Parfois aussi certains charlatans incitent leurs victimes à regarder intensément le soleil dans le but de "se fortifier les yeux". On peut aisément imaginer les résultats de cette forme de "thérapie".

Pendant la guerre, les aviateurs furent souvent victimes de lésions oculaires à la suite d'expositions excessives à la lumière du soleil. Des cas similaires se produisirent parmi le personnel de la défense contre avions qui devait scruter le ciel aux jumelles.

Les lésions rétinienne dues à la lumière solaire se traduisent par des symptômes à la fois objectifs et subjectifs.

Les symptômes subjectifs sont extrêmement caractéristiques. Ils peuvent apparaître sans lésions morphologiques de la rétine et leur étendue n'est pas nécessairement liée aux dimensions de cette dernière. A l'exception d'une certaine impression d'aveuglement, le patient ressent peu d'effets immédiats. Au bout de peu de temps, cependant, il éprouve une sensation de voile diffus sur l'oeil affecté. Une persistance inquiétante des images se produit, accompagnée parfois de photophobie et de chromatopsie ou de photopsie. Au bout de 24 heures environ, ce voile diffus se contracte pour former un scotome dans le champ visuel. Ce scotome peut persister des semaines ou même des mois. Dans certains cas, il peut être permanent. On peut facilement le déceler en faisant fixer par le patient, de son oeil malade, des mailles de fil métallique moyennement fines, et surtout, le patient lui-même s'en rendra compte en lisant. En un certain point du champ visuel, les lettres s'estomperont ou disparaîtront complètement. Parfois, et en particulier au stade initial, le patient a l'impression que ce défaut est en mouvement: ses contours peuvent se modifier, il peut tourner autour de son axe, et sembler voltiger. L'acuité de la vision centrale est altérée par l'emplacement typique du scotome (scotoma heliocliticum). Généralement, l'acuité diminue d'environ 50%, ce pourcentage pouvant aller parfois jusqu'à environ 90%. Les scotomes peuvent avoir des dimensions très variables. Ils peuvent être de nature absolue ou relative; parfois ils deviennent relatifs après avoir été absolus au départ. Parfois encore, un scotome absolu est entouré d'un scotome annulaire relatif. En quelques semaines, ou quelques mois, il se rétracte pour disparaître ensuite complètement. Malheureusement, il n'en est pas toujours ainsi. Toutefois, des défauts qui étaient initialement importants peuvent également disparaître, mais le stade final est fréquemment l'établissement d'un scotome central permanent. Ce dernier est parfois si petit qu'il est très difficile à diagnostiquer. Il est possible, cependant, qu'un défaut central important subsiste. Strughold rapporte la persistance d'un cas particulier depuis 40 ans. Le champ visuel périphérique demeure normal; cependant, en particulier au cours des premières semaines, un scotome annulaire relatif s'étendant sur $20 \text{ à } 40^\circ$ environ apparaît fréquemment et, dans la plupart des cas, disparaît par la suite (Birch-Hirschfeld).

Des lésions oculaires surviennent fréquemment chez les aviateurs sans que ces derniers s'en aperçoivent. On les découvre à l'occasion d'examen détaillés des yeux effectués pour des raisons tout à fait différentes.

L'apparition de métamorphopsie constitue une transition vers la phase des symptômes objectifs. Au stade précoce, on l'attribue à un oedème rétinien provoquant un déplacement des éléments structuraux de la rétine. Par la suite, elle résulte principalement de modifications dues à la dégénérescence.

Les symptômes objectifs se manifestent tout d'abord par un oedème dans la zone de la macula. Dans les cas bénins, la macula semble un peu plus foncée, en raison, probablement, d'une hyperémie locale des vaisseaux de la choroïde. Dans les cas plus graves, la région rétinienne centrale est congestionnée; elle est oedémateuse et sa couleur vire parfois au gris. Des hémorragies minuscules, semblables à des mouchetures, peuvent se produire.

Parfois, la tache foncée centrale est entourée d'un décollement oedémateux de la rétine. Dans la plupart des cas, des taches ovales ou en forme de demi-lune apparaissent dans la macula, pour se transformer graduellement en tissu rétinien normal. La tache centrale est probablement due à des brûlures de l'épithélium pigmenté, tandis que

le halo qui l'entoure résulte d'une accumulation de pigment. Dans les cas graves un oedème rétinien étendu se produit; on a alors un ensemble de symptômes cliniques qui peuvent rappeler ceux d'une névrite du nerf optique. En dehors de la zone de la macula peuvent apparaître de petits foyers d'atrophie chorioretiniennes. Le décollement de la rétine, l'occlusion des vaisseaux centraux, les hémorragies rétiniennes, la névrite rétrobulbaire et l'atrophie du nerf optique n'apparaissent que rarement.

Il n'est pas facile d'établir un pronostic en ce qui concerne les lésions oculaires provoquées par la lumière solaire. Dans la majorité des cas, la faculté de vision s'améliore au cours des deux premiers mois. Si des scotomes subsistent, ils deviennent pour la plupart relatifs et sont parfois trop petits pour permettre une fixation excentrique. A l'intérieur de la macula, la zone rouge parsemée de points jaunes vire le plus souvent au gris et peut même disparaître complètement. En règle générale, on peut établir un pronostic favorable si les symptômes, en particulier les scotomes, s'atténuent au cours du premier mois. Une amélioration est encore possible après plusieurs mois; dans la plupart des cas, cependant, les détériorations sont irréparables. Si la macula a été le siège d'une lésion, en particulier s'il s'y est formé un trou, il est probable qu'un défaut permanent de la vision centrale s'établira. Même après plusieurs années, il arrive fréquemment que la taille d'un scotome diminue à tel point qu'il n'est plus décelable. Malheureusement, il ne s'agit là que de cas rares.

4. PHOTOLESIONS RETINIENNES DUES AUX SOURCES LUMINEUSES TECHNIQUES ET A L'ECLAIR

Les sources lumineuses techniques de forte intensité créent parfois des perturbations visuelles subjectives alors que les symptômes objectifs sont rares. L'observation prolongée de la flamme d'une lampe à arc, ou d'un arc à souder électrique ou autogène peut réduire l'acuité visuelle et provoquer la formation de scotomes dans un oeil non protégé. Parfois on peut également avoir un rétrécissement du champ visuel périphérique. L'erythropsie et la xanthopsie sont des symptômes rares. Il existe une différence entre ce syndrome clinique et celui de la kératite photo-électrique que provoque très fréquemment la soudure électrique, car ce dernier traduit une affection de la cornée créée par l'arc à souder électrique, riche en rayons ultraviolets. Les rayons ultraviolets ne pénètrent pas à l'intérieur de l'oeil à travers la cornée.

Selon Rutgers (cité par Duke-Elder) l'intensité lumineuse produite au cours d'une soudure autogène à 40 cm de l'oeil atteint $156.000 \text{ ergs. sec. cm}^{-2}$, dont 95% de lumière infrarouge. On peut observer la formation de scotomes temporaires, et, sans qu'apparaissent des signes évidents sur le fond d'oeil, la vision peut être réduite à la perception des mouvements des mains. Il est très rare que des symptômes objectifs se manifestent sur le fond d'oeil. On a pu observer en certaines occasions des oedèmes rétiens et des modifications de la macula aboutissant à la formation de trous.

L'observation prolongée d'une lumière incandescente émanant d'un four électrique ou du foyer d'une locomotive provoque parfois des modifications périphlébitiques de la rétine, des hémorragies du corps vitré et des lésions chorioretiniennes. On a parfois découvert des lésions similaires chez les souffleurs de verre. Ces lésions peuvent également se produire à la suite de courts circuits de lignes électriques ou encore à la suite d'éclairs. Ten Doesschate mentionne également l'apparition de scotomes annulaires à la suite d'un aveuglement causé par des lampes à rayons ultraviolets.

Il est douteux que les lésions du fond d'oeil, en particulier les modifications de la macula, entraînées par ce type de sources lumineuses soient invariablement de nature thermique. Naidoff et Sliney ont observé un cas de lésion de la macula provoquée par la lumière d'un arc à souder électrique sur un oeil non protégé. En effectuant des mesures sur des arcs électriques et en procédant à des analyses des conditions d'énergie, ils conclurent que cette lésion particulière était de nature thermique, car la quantité d'énergie requise pour entraîner ce type de lésion n'avait pas été atteinte. Dans ce cas, le mécanisme de réaction aurait pu être différent, ou la lésion aurait pu être causée par un processus photo-chimique. On s'est demandé si de tels processus ne jouaient pas un rôle dans la plupart des lésions rétiniennes provoquées par cette catégorie de sources lumineuses.

5. PHOTOLESIONS RETINIENNES RESULTANT D'EXPLOSIONS ATOMIQUES

Avec le développement des armes nucléaires, le problème posé par les photolésions rétiniennes a pris une importance inattendue. La détonation d'une charge atomique s'accompagne tout d'abord d'un éclair lumineux intense. Dans le cas d'une bombe à fission nucléaire de 20 kT (charge nominale), le diamètre de la boule de feu sphérique atteint 13,7 m en 0,1 milliseconde et sa température superficielle s'élève à 300.000 K. A une distance d'environ 10 km, l'intensité lumineuse est 100 fois celle du soleil. Le rayonnement émis par l'éclair initial (flash) est riche en rayons bleus et ultraviolets. Au bout de 10 millisecondes, ce rayonnement devient rougeâtre. Comme la température superficielle, la quantité de lumière émise par unité de surface et le type de rayonnement se modifient considérablement.

Il est évident que des intensités lumineuses aussi élevées auront un effet sur la rétine. Lorsque l'observateur regarde dans la direction de la boule de feu, l'image de cette boule se forme sur sa rétine. Par conséquent, cette image initiale reçoit, par unité de surface, la totalité de l'énergie de rayonnement émise. Au fur et à mesure que la boule

de feu s'étend, des zones annulaires qui reçoivent une quantité moindre d'énergie par unité de surface se forment autour de l'image initiale. En outre, le rayonnement prend une teinte plus rougeâtre que l'éclair initial. Le diamètre de l'image de la boule de feu, telle qu'elle se forme sur la rétine, varie linéairement suivant les dimensions et la distance de cette boule. La largeur d'ouverture de la pupille joue aussi un rôle considérable.

L'apparition d'une lésion rétinienne ne dépend pas uniquement de la distance de l'explosion. Elle est également, dans une très large mesure, influencée par les conditions de transmission à travers l'atmosphère. La pluie, la fumée, la poussière et le brouillard peuvent apporter une protection importante.

La puissance d'une arme nucléaire ne joue qu'un rôle secondaire dans la formation d'une brûlure rétinienne. Dans des conditions atmosphériques identiques une bombe de 2 mégatonnes libère bien une énergie de 100 fois supérieure à celle que produit une bombe de 20 kT et son rayonnement total est le même, à une cinquantaine de km de distance, que le rayonnement de cette dernière à 5 km. Cependant, les petites bombes libèrent leur énergie plus rapidement et l'image de la boule de feu qui se forme sur la rétine est d'un diamètre plus faible. La radiation émise atteint l'oeil en un délai si bref que le mécanisme de protection de ce dernier (réflexe de clignement et contraction de la pupille) n'a pas le temps d'entrer en action. En ce qui concerne les armes de l'ordre de la mégatonne, l'onde d'impulsion thermique dure assez longtemps pour assurer à l'oeil un certain degré de protection en déclenchant le réflexe de clignement.

6. PHOTOTRAUMATISMES RETINIENS (RESUME)

Une lumière d'une intensité excessive peut provoquer des lésions de la rétine par effet thermique. Les rayons de cette nature appartiennent aux régions visibles et infrarouges du spectre. Il sont essentiellement absorbés par l'épithélium pigmenté de la rétine et convertis en chaleur. La température et la durée d'exposition déterminent la gravité des lésions thermiques ainsi provoquées. Un certain pourcentage de chaleur peut être dissipé par le système vasculaire de l'oeil, en particulier par les vaisseaux de la choroïde. Ainsi, les sources lumineuses d'une intensité moindre n'endommagent la rétine qu'au bout d'un temps plus long. Toutefois, lorsque la rétine est frappée par une onde lumineuse de forte intensité, comme l'éclair d'une explosion nucléaire ou un rayon laser, la chaleur est libérée avec une telle rapidité qu'elle ne peut être dissipée par le cours du sang.

Il existe une différence très nette entre l'apparition d'une lésion cutanée provoquée par la lumière et celle d'une photolésion rétinienne. Dans le premier cas, l'intensité de l'énergie incidente est inversement proportionnelle au carré de la distance de la source lumineuse. Cette remarque ne s'applique pas aux lésions rétiniennes en raison de la nature du système optique humain. L'image de la source lumineuse se forme alors sur la rétine et une très forte densité d'énergie s'accumule dans une zone minuscule de la rétine. Les lésions rétiniennes provoquées par une lumière d'une intensité excessive sont de deux types:

- (1) Les lésions morphologiques que l'on peut détecter sur le fond d'oeil grâce à des instruments optiques;
- (2) Les atteintes fonctionnelles que l'on peut identifier, si elles sont suffisamment importantes, en déterminant, au moyen de paramètres, les défauts du champ de vision; ces atteintes ne sont pas décelables sur le fond d'oeil d'un oeil vivant à l'aide de dispositifs optiques.

Nous supposons toutefois qu'il existe une transition continue entre ces deux types de détériorations. En outre, on peut déceler des lésions microscopiques par des examens histologiques des régions de l'oeil ayant subi un phototraumatisme, mais l'examen histologique d'un oeil traumatisé n'est pas possible dans tous les cas. Pour pouvoir procéder à l'évaluation clinique des phototraumatismes rétiniens, le classement en lésions morphologiques et fonctionnelles est par conséquent justifié.

7. PHOTOTRAUMATISMES OCULAIRES PROVOQUES PAR LES RAYONS LASER

En ce qui concerne l'évolution d'un phototraumatisme, il faut noter les différences marquées entre la lumière émise par un rayon laser et celle provenant des sources lumineuses très intenses connues à ce jour. Les facteurs qui entrent en jeu dans le cas de ces derniers sont essentiellement:

- (1) le facteur thermique,
- (2) le facteur photochimique.

Ce dernier est important, en particulier pour les lésions "seuil". En ce qui concerne les lasers, de nombreux autres facteurs sont à considérer:

- (1) l'action thermique,
- (2) les ondes de choc acoustico-mécaniques,
- (3) le facteur photochimique,
- (4) la production d'oscillations harmoniques, par exemple doublement ou triplement de fréquence, etc. et l'interférence de résonance.

- (5) l'apparition de radicaux libres,
- (6) la diffusion Brillouin,
- (7) la diffusion Raman, et
- (8) la réflexion.

Les facteurs qui revêtent une importance considérable dans la formation des lésions dues aux lasers comprennent presque toujours l'action thermique, les ondes de choc acoustico-mécaniques et, peut-être, le doublement de fréquence et l'interférence de résonance. Les effets des autres facteurs se trouvant masqués par ces derniers facteurs se manifestent seulement dans le cas des lésions qui sont voisines de la valeur seuil. Il en est de même pour les effets partiels du doublement de fréquence. Pour étudier ces effets, il faut que les essais soient effectués de manière à ce que le facteur thermique n'ait qu'une faible action. Pour cela, on peut réduire la durée d'impulsion par exemple, par blocage d'un mode etc. Des oscillations harmoniques se produisent pour des champs électriques et magnétiques de forte intensité et des durées d'impulsion très courtes. L'influence biologique des oscillations harmoniques et des facteurs (5) à (8) fait actuellement l'objet de recherches intensives.

En général, il n'existe pratiquement aucune différence entre les lésions rétinienne dues aux rayons laser et celles provoquées par d'autres sources lumineuses de très forte intensité. Les lésions peuvent être insignifiantes au départ, se manifestant par exemple par un oedème rétinien réversible, puis s'aggraver régulièrement, avec apparition de nécrose de la rétine et de la choroïde. Les lésions les plus graves se traduisent par des ruptures explosives de la rétine et de la choroïde accompagnées d'une hémorragie importante avec écoulement de sang dans l'humeur vitrée, ou même d'une perforation de la sclérotique. La fonction de l'oeil est affectée différemment suivant les régions de la rétine qui se trouvent lésées. Le patient ne décelera probablement pas lui-même les lésions de moindre gravité, si elles sont assez petites. Par contre, les rayons laser entraînent parfois la cécité lorsqu'ils frappent la macula, le point de la vision centrale, ou le nerf optique. Des lésions du faisceau papillaire de la macula peuvent également provoquer de graves troubles de la fonction visuelle. Il est toutefois évident que la gravité d'une atteinte dépend aussi de la taille de la lésion. Cependant, même des lésions minuscules comme celles fréquemment causées par des lasers à fréquence de répétition d'impulsions élevée ont parfois des effets cumulatifs et entraînent finalement une détérioration importante de type permanent.

Les dangers présentés par un rayon laser ne résident pas seulement dans les atteintes provoquées par une exposition directe de l'oeil à une lumière intense, mais aussi dans celles entraînant la réflexion du rayon sur une surface, en particulier s'il s'agit d'une surface spéculaire. Ce dernier cas constituerait même la cause la plus fréquente de lésions car nombreuses sont les personnes qui évitent normalement une exposition directe qui ne sont pas nécessairement conscientes de ce genre de danger.

Dans le spectre visible, la lumière est émise sous forme d'un rayon virtuellement parallèle à forte collimation qui est réfracté par l'oeil pour former une image sur la rétine. Les images ainsi formées ont des dimensions variables, allant de 200 microns jusqu'à 10 à 20 microns (limité de diffraction de l'oeil). Dans les images de petite taille, on a une accumulation de fortes densités d'énergie qui peut même dépasser des valeurs de l'ordre du gigawatt, c'est-à-dire 10^9 W/cm². Les énergies accumulées varient le plus souvent suivant le principe de fonctionnement du laser utilisé, par exemple les lasers à impulsions "à mode bloqué" à durées d'impulsion de l'ordre de la picoseconde (10^{-12} sec), les lasers à déclenchement dont les durées d'impulsion sont de l'ordre de la nanoseconde (10^{-9} sec) ou les lasers continus.

Un autre facteur intervient dans l'accumulation d'énergies: c'est le type de matériau employé pour le laser. Outre les caractéristiques physiques des instruments à laser, les propriétés spectrales de l'oeil sont importantes. C'est ainsi que les milieux oculaires transmettent 90 à 95% de la lumière émise par un laser à rubis avec une longueur d'onde de 694,3 nm, mais seulement 45% de la lumière produite par un laser à néodyme. Le fond d'oeil reflète environ 15 à 20% de la lumière d'un laser à rubis, et seulement 40% de la lumière d'un laser à néodyme. Cependant, en raison du taux d'absorption supérieur, les milieux oculaires sont beaucoup plus vulnérables aux atteintes d'un rayon laser à néodyme.

La taille de la pupille constitue également un facteur important dans la formation d'une lésion rétinienne. Lorsque la lumière du jour est intense, le diamètre de la pupille est d'environ 3 mm, alors que dans l'obscurité il est de 6 à 7 mm. Par conséquent, il est évident que, plus le diamètre de la pupille est petit, plus faible est la quantité de lumière émise par un laser pouvant atteindre la rétine. Malheureusement, la taille de la pupille n'assure pas toujours un certain degré de protection, car il existe des rayons laser dont le diamètre est inférieur à 2 mm.

La pigmentation de l'oeil joue également un rôle important dans la formation des lésions de la rétine. Elle ne varie pas seulement d'un individu à l'autre, mais aussi d'une zone de l'oeil à l'autre. Les races humaines à forte pigmentation sont particulièrement sensibles aux rayons laser.

La nature et la gravité d'une lésion dépendent dans une vaste mesure de la durée d'exposition. Pour des intensités lumineuses identiques, les effets d'une exposition brève sont plus faibles que ceux d'une exposition prolongée. Des examens de lésions "seuils" bénignes de la rétine produites par des impulsions de durée relativement faible (de 0,2 à 2,0 msec) ont révélé des atteintes histologiques de seul l'épithélium pigmenté. Pour des durées d'exposition supérieures à 10 msec, on a également constaté la formation de lésions choroïdiennes. La faculté d'absorption lumineuse de l'épithélium pigmenté étant à peu près la même que celle de la choroïde, la différence

entre les effets observés doit être attribuée à la différence d'épaisseur des tissus. Dix fois plus épaisse que l'épithélium pigmenté, la choroïde n'est affectée que par une quantité d'énergie lumineuse dix fois supérieure par unité de volume. Par conséquent, à condition que les lasers utilisés aient approximativement la même intensité lumineuse, les lasers à déclenchement, pour un temps d'exposition inférieur à 1 msec et la plupart des lasers pulsés dont la durée d'impulsion varie de 1 à 2 msec n'affectent, dans les cas bénins, que l'épithélium pigmenté tandis que les lasers continus peuvent endommager la choroïde.

Bien que ce soit l'effet thermique qui joue le rôle le plus important dans la formation des photolésions de la rétine, d'autres facteurs entrent également en jeu. En particulier dans le cas des lasers à déclenchement à très forte densité d'énergie (megawatts/cm²) et à impulsions de faible durée (5 à 50 msec), l'incidence des lésions ne peut être uniquement attribuée à la chaleur libérée. On doit poser comme hypothèse le fait que d'autres facteurs physiques jouent un rôle important: ainsi l'ionisation ou les ondes de choc qui pourraient être responsables de rupture de vaisseaux, et du passage de substances tissulaires dans l'humeur vitrée. Une radiation d'une intensité extrêmement élevée et de longueur d'onde monochromatique constitue en elle-même un stimulus anormal. Ceci pourrait expliquer pourquoi les systèmes biologiques sont parfois ébranlés par une interférence de résonance. Toute liaison moléculaire présentant une résonance à cette fréquence spécifique peut être affectée. Cependant, si des supports génétiques ou des systèmes enzymatiques sont lésés par ce type d'interférence, un certain nombre de réactions pathologiques se produit. Ceci pourrait être le cas, en particulier, lorsque la dose de radiation est telle qu'elle provoque des lésions "submorphologiques", c'est-à-dire fonctionnelles. On a pu constater des détériorations des systèmes enzymatiques de la rétine à la suite d'une exposition aux rayons laser. Ce qu'on appelle le "doublement de fréquence" exerce également un effet qui dépend de la fréquence. La substance pigmentaire contenue dans les cellules pigmentaires de la rétine présente une structure cristalloïde et pourrait libérer des ultraviolets d'une longueur d'onde de 347,2 nm après avoir été frappée par un rayon laser. Or, la zone où ils seraient libérés, zone située entre la rétine et la choroïde, n'est jamais exposée en général aux radiations ultraviolettes. A l'heure actuelle, on ignore les réactions susceptibles d'être provoquées dans la rétine par ce type de lumière ultraviolette.

L'oeil n'est pas seulement sensible à la lumière du spectre visible et du proche infrarouge, mais également aux radiations de l'ultraviolet et de l'infrarouge lointain. Ainsi qu'il est mentionné plus haut, un laser à néodyme peut causer des lésions des milieux optiques, non seulement de la cornée et du cristallin, mais aussi de l'humeur vitrée. Or, ce type de lésion n'a pu être détecté sur les yeux de lapins exposés aux rayons d'un laser à rubis à déclenchement, même lorsqu'il a été utilisé à sa puissance maximale. Ceci peut s'expliquer par le faible degré d'absorptivité d'énergie des structures concernées à la longueur d'onde du laser à rubis. De plus, l'effet mécanique du rayon laser ne semble pas suffisamment marqué pour entraîner des modifications de structure lorsque ce rayon atteint les tissus en cause. L'iris diffère de la cornée et du cristallin par son absorptivité d'énergie relativement élevée à la longueur d'onde du rubis. Malgré son niveau d'énergie élevé, le laser à déclenchement ne cause, pour l'iris, que des détériorations minimes.

Le laser à CO₂, dont la longueur d'onde est de 10,6 microns, constitue un danger particulier pour la région antérieure de l'oeil. En effet comme nous l'avons mentionné plus haut, son rendement énergétique est extrêmement élevé, et, en outre, 67% environ des rayons présentant cette longueur d'onde sont absorbés par les 10 premiers mm de la cornée. Cela signifie que les milieux optiques, qui sont normalement transmetteurs, ne le sont pas pour cette longueur d'onde. Cette remarque s'applique également à la peau dont les brûlures ont toutefois des conséquences moins critiques. Des examens cliniques et histologiques ont révélé que les yeux des lapins ne sont pas lésés par une exposition de 30 minutes à des radiations présentant une densité d'énergie de 0,1 W/cm². Cependant, des animaux exposés pendant une seconde à une densité d'énergie de 1,5 W/cm² ont souffert d'atteintes de la cornée, qui se sont toutefois avérées réversibles et n'étaient plus décelables quelques jours plus tard. Des densités d'énergie plus fortes provoquent des ulcérations profondes et graves qui entraînent par la suite la perte de l'oeil.

8. LES EFFETS DU LASER SUR LES CELLULES ET LES STRUCTURES CELLULAIRES

Voici longtemps déjà que l'on étudie les effets exercés par la lumière, y compris les sources lumineuses d'intensité excessive, sur les cellules et leurs éléments constitutifs. Les premières études ont porté sur la lumière à large bande; elles furent suivies de tests pour lesquels furent utilisées certaines longueurs d'onde. Le laser convient particulièrement à ce genre de recherches. En effet, la cohérence et la longueur d'onde unique des rayons laser permettent d'obtenir un contraste marqué entre les effets exercés dans les diverses régions du spectre. D'autre part, grâce à la forte intensité de ces rayons, on peut obtenir des lésions sélectives ou une destruction complète des tissus exposés. Ainsi que nous l'avons déjà mentionné, il existe des microscopes à laser capables de concentrer un rayon sur un diamètre de 2 microns, ou même d'un seul micron. De tels pinceaux de lumière sont importants pour l'étude des organules cellulaires. Le laser présente également l'avantage de permettre d'irradier des cellules extrêmement mobiles avec des impulsions de faible durée. Les radiations laser peuvent retarder la division des cellules, empêcher leur croissance et altérer leur différenciation. La présence de pigments spécifiques à l'intérieur de la cellule facilite l'absorption des rayons laser. La destruction totale ou partielle d'organules a permis d'acquérir certaines connaissances sur la fonction cellulaire. C'est ainsi que des autoradiographies de mitochondries irradiées par laser ont révélé des détails importants sur l'assimilation des acides nucléiques. Les effets des rayons laser sur les macromolécules comme le tryptophane, les protéines, la gamma-globuline, les enzymes, les acides nucléiques etc. ont également fait l'objet d'études intensives. Les résultats obtenus diffèrent considérablement et de nombreuses recherches sont encore à poursuivre dans ce domaine. Il est intéressant de noter que, in vivo, les systèmes macro-

moléculaires se remettent plus facilement d'une irradiation par laser que *in vitro*. L'inactivation et la destruction des macromolécules, des organules et des cellules est probablement due essentiellement à la chaleur dégagée et aux ondes de choc. On peut également observer la formation de radicaux libres, mais leur effet sur la structure et l'activité cellulaires est présumée sans importance. L'absorption, par la cellule, de la lumière émise par un laser, constitue un processus moléculaire dont le cours varie suivant l'organule concerné. La chromatine des noyaux peut floconner et des vacuoles peuvent s'y former. Selon la longueur d'onde, l'absorption par la mitochondrie peut être supérieure à l'absorption par le noyau. Des différences de concentration aqueuse ou de résistance thermique parmi les acides nucléiques pourraient expliquer le fait que parfois le noyau est moins sensible à la lumière d'un rayon laser que le cytoplasme.

9. LES APPLICATIONS THERAPEUTIQUES DU LASER

On envisage depuis longtemps la possibilité de traiter les affections de la rétine par l'application de lumière visible d'une très forte intensité. On avait en effet observé qu'une rétinite solaire laisse, sur le fond d'oeil, une cicatrice chorio-rétinienne dans laquelle la rétine et la choroïde sont solidement soudées entre elles. Cependant, ce projet n'a pu trouver sa réalisation avant 1950. Meyer-Schwickerath, de l'Université de Bonn, et Littmann, de la Société Zeiss ont mis au point le photocoagulateur bien connu qui utilise, comme source de lumière blanche de forte intensité, une lampe à xénon à haute pression. Après l'invention du laser, environ 10 ans plus tard, ce dernier fut employé pour les mêmes applications thérapeutiques. Il constitue en effet une source lumineuse de très forte intensité dont les caractéristiques sont supérieures en certains points, mais encore inférieures dans de nombreux cas, à celles de la lampe à arc à xénon. La thérapie dont il est question consiste à provoquer la conversion d'énergie lumineuse en chaleur par les tissus pigmentés; il se produit alors une coagulation. La mélanine et l'hémoglobine sont les substrats qui absorbent la lumière au sein des tissus. La cornée, l'humeur aqueuse, le cristallin et le corps vitré ne subissent pas de modification sous l'effet de la lumière visible, alors que l'iris et l'épithélium pigmenté de la rétine et de la choroïde, avec leur différents degrés de pigmentation, peuvent être coagulés.

Parmi les divers types de laser, cinq seulement présentent un intérêt du point de vue ophtalmologique. Ce sont le laser à rubis, le laser à néodyme, les lasers pulsés dont la durée d'impulsion varie de quelques microsecondes à quelques millisecondes, ainsi que le laser à néon et hélium et le laser à argon qui fonctionnent de façon continue. Le laser à YAG-Nd offre également un intérêt ophtalmologique. On peut l'utiliser indifféremment comme laser pulsé ou continu. A l'heure actuelle, ce sont essentiellement les lasers à rubis dont la durée d'impulsion varie de 200 microsecondes à quelques millisecondes qui sont utilisés pour des applications cliniques. Les lasers à déclenchement utilisant des rubis ne peuvent être employés pour des applications thérapeutiques car ils présentent un danger considérable pour le fond d'oeil. En ce qui concerne les opérations de l'oeil, les lasers à rubis présentent un avantage; en effet, la lumière monochromatique rouge sombre qu'ils émettent ne crée pas de photophobie. Etant donné la faible durée d'exposition nécessaire, une anesthésie ne s'impose pas. En outre, et c'est un avantage supplémentaire, un traitement au voisinage de la macula n'implique qu'un faible risque. Cependant les lasers à rubis présentent aussi des inconvénients majeurs. La lumière rouge qu'ils émettent (694,3 nm) convient mal à une coagulation vasculaire du fond d'oeil, car elle n'est que très faiblement absorbée par les vaisseaux sanguins, les angiomes ou les anévrismes. Le pigment sanguin a presque la même couleur spectrale que la lumière du rubis qui est réfléchi en grande partie lorsqu'elle frappe des tumeurs vasculaires. En outre, dans le cas de lasers pulsés, la durée d'exposition est souvent trop faible. Au cours d'une brève impulsion le tissu reçoit la totalité de l'énergie émise, et comme on ne peut procéder à des réglages pendant la durée de l'exposition, de graves complications telles que des hémorragies de l'humeur vitrée ou de la rétine peuvent survenir si l'énergie libérée en une seule fois est trop forte. Les lésions du fond d'oeil sont très nettement circonscrites, ce qui constitue un inconvénient si l'on désire que la réaction s'effectue sur une zone plus étendue.

Le laser à néodyme (1060 nm) présente l'inconvénient suivant: les milieux oculaires absorbent dans une très large mesure la lumière qu'il dégage, ce qui peut conduire au développement de cataractes, ou à une opacification du corps vitré. On a pu constater, à la suite d'expérimentations sur des animaux, des modifications électrophorétiques des protéines du corps vitré. Le laser à néodyme présente encore un désavantage: il lui faut, pour produire le même type de lésion du fond d'oeil, 5 à 10 fois plus d'énergie que le laser à rubis. Par contre, son rayon est invisible et par conséquent, ne provoque ni aveuglement ni photophobie lorsqu'on l'utilise au cours d'opérations de l'oeil.

Le laser à hélium et néon (632,8 nm) est un laser continu à gaz qui émet une vive lumière rouge. Contrairement au laser à rubis, ses durées d'exposition sont variables, ce qui constitue un avantage. Toutefois, des temps d'exposition prolongés nécessitent une anesthésie rétrobulbaire. En outre, sa lumière est plus aveuglante que celle du laser à rubis.

Le laser à argon émet de nombreuses longueurs d'onde allant du bleu-vert à l'ultraviolet, et dont les principales sont 488 et 515 nm. Ce laser continu présente de nets avantages par rapport au laser à rubis. Etant donné que la transmission des principales longueurs d'onde à travers les milieux oculaires s'effectue à presque 95%, il est également supérieur au laser He-Ne. En outre, l'énergie qu'il émet est supérieure à celle émise par ce dernier. Il présente également un autre avantage: les principales longueurs d'onde sont, dans une très large mesure, absorbées par l'hémoglobine et par l'épithélium pigmenté de la rétine. Le laser YAG-Nd semble également présenter des possibilités intéressantes. Son matériau est constitué par un cristal de grenat d'aluminium yttrium dopé au

néodyme, qui émet une longueur d'onde de 1064 nm. Cette longueur d'onde est proche de celle du laser à néodyme; le laser YAG-Nd possédant une énergie suffisante, on peut utiliser sa deuxième onde harmonique; on obtient, par doublement de fréquence, une longueur d'onde de 532 nm. Cette longueur d'onde n'est pas tout à fait aussi avantageuse que les principales longueurs d'onde du laser à argon; cependant, cet inconvénient mineur est plus que compensé par le fait qu'il peut fonctionner comme laser pulsé aussi bien qu'à déclenchement, et même comme laser continu.

Dans le traitement des affections rétinienne, les effets de la photocoagulation sont (1) la cicatrisation et (2) l'oblitération des vaisseaux.

Etant donné l'existence d'une scissure rétinienne potentielle entre l'épithélium pigmenté et l'épithélium sensoriel, la cicatrisation revêt une importance spéciale dans le traitement opératoire des décollements de la rétine. Grâce à la photocoagulation, on a également pu procéder avec succès au colmatage de trous de la rétine, en particulier au pôle postérieur de l'oeil et au traitement opératoire de la rétinopathie. On obtient l'occlusion permanente de vaisseaux sanguins grâce à la formation d'un coagulum et à l'aménagement ultérieur du caillot. Ceci est important dans le traitement de certaines affections au cours desquelles on voit se former des vaisseaux sanguins sur le fond d'oeil (rete mirabile), par exemple à l'occasion de rétinopathies diabétiques et de périphlébites de la rétine (affection d'Eales). Ce sont également les rayons laser qui constituent l'instrument le plus efficace dans la photo-oblitération des micro-anévrysmes, ces symptômes de la rétinopathie diabétique. Certaines tumeurs vasculaires telles qu'angiomes et angiomatose de la rétine ont également été traitées avec succès par la photocoagulation.

On a, d'autre part, fait appel au laser dans des opérations nécessitées par des affections des régions antérieures de l'oeil, par exemple pour la perforation de l'iris, pour des iridectomies optiques ou thérapeutiques, mais aussi dans le traitement de la tuméfaction de l'iris. Le laser a également été utilisé dans le traitement du glaucome avec un angle iridien fermé, où l'on s'est efforcé de pratiquer une ouverture dans l'angle iridien afin de permettre le drainage de l'humeur aqueuse. En outre, le traitement par photocoagulation du glaucome avec angle iridien largement ouvert a été tenté récemment. Sans doute serait-il prématuré de formuler dès maintenant des conclusions dans ce domaine; il importe toutefois de noter que l'on a essayé de pratiquer des goniotomies et des trabéculotomies à l'aide d'autres procédés de cautérisation et que l'on a rarement obtenu le succès escompté.

L'emploi du laser dans le traitement des affections de la macula a été très souvent couronné de succès. Les affections de ce type ont une importance considérable du point de vue du processus visuel; elles impliquent à la fois une inflammation et une dégénérescence. Parfois aussi, elles ont pour origine des traumatismes ou des dérèglements du métabolisme. Leur traitement doit être rapide, car si les effets thérapeutiques s'établissent trop lentement, le tissu rétinien est remplacé par une prolifération gliale qui se traduit par une réduction de la vision centrale. C'est ici que l'angiographie à l'acide de fluorescéine est d'un intérêt considérable. Cette technique permet en effet de visualiser de minuscules points de suintement, même en présence d'un grave oedème de la macula. On peut les situer exactement grâce à des photographies du fond d'oeil et à des examens à la lampe à fente, effectués avec une lentille en rubis ou une lentille de contact. On a pu traiter avec succès certains cas de rétinopathie centrale séreuse, affection qui, malgré une tendance marquée à la guérison spontanée, présentait un taux élevé de cicatrisation défectueuse. Certains cas de chorioretinite centrale ont également été traités avec succès grâce à la photocoagulation par laser. L'histoplasmose est fréquemment à l'origine de ce type d'affection, qu'il est difficile de traiter par des médicaments. Ni les stéroïdes ni les antibiotiques ne se sont révélés efficaces dans ce domaine. Les désensibilisations ont également échoué. Si la lésion inflammatoire est peu étendue, la photocoagulation par laser est une technique utile; dans le cas de lésions étendues, par contre, elle est la plupart du temps inefficace. L'oedème de la macula survenant à la suite d'opérations de la cataracte, ainsi que l'oedème microkystique de la macula, qui se produit à la suite d'une phlébothrombose de la rétine et dans la rétinopathie diabétique, réagissent favorablement à la photocoagulation. Par contre, cette thérapie s'est avérée inefficace dans des cas de dégénérescence discoïde sénile de la macula.

Le traitement des tumeurs ophtalmiques aux rayons laser n'a donné que des résultats contestables. L'étude des effets obtenus sur des tissus pigmentés et non pigmentés atteints d'une tumeur a montré que les masses tumorales n'étaient pas totalement détruites. Dans la plupart des cas, l'irradiation ne couvre pas toutes les régions atteintes. Une zone hyperémique se forme autour du foyer irradié (effet histaminique) et des cellules viables de tumeur risquent d'être disséminées par la circulation sanguine. On a pu observer que, malgré une exposition maximale à des rayons laser, des cellules de tumeur placées dans une culture poursuivaient normalement leur croissance et demeuraient inchangées morphologiquement.

Les opérations effectuées à l'aide de rayons laser posent un autre problème: celui du dosage correct de la quantité d'énergie requise. Si la dose est trop forte, une explosion avec dégagement de vapeur d'eau peut se produire, entraînant une rupture du tissu tumoral. Des cellules de tumeur vivantes sont alors projetées dans les régions voisines et ce processus peut aboutir au développement de métastases, en particulier dans la région interne de l'oeil.

Dans des opérations chirurgicales importantes, on a essayé d'utiliser des lasers à argon ou à CO_2 pour couper des parties molles. Le saignement étant minime, cette méthode présenterait un avantage tout particulier pour les organes pléthoriques, malgré la formation d'escarres à la surface de l'incision. Malheureusement, ces lasers opératoires sont d'un maniement très délicat. Ils comportent un risque d'incendie considérable. De plus, le chirurgien et ses assistants sont très fréquemment victimes de brûlures. La réflexion des rayons par les instruments chirurgicaux

représente un danger supplémentaire. Le champ opératoire est obscurci et le chirurgien gêné par la formation de fumée et de vapeur. En admettant même que l'on puisse éliminer ces facteurs négatifs, le laser, utilisé à des fins opératoires, ne constituerait pas un progrès important dans le domaine chirurgical par rapport aux méthodes utilisées jusqu'ici.

On a également fait appel au laser en dermatologie, à des fins thérapeutiques, et obtenu de très bons résultats pour la suppression des marques de tatouage. Cependant, le traitement de tumeurs cutanées aux rayons laser s'est révélé décevant. La même remarque peut s'appliquer au traitement laser des tumeurs ophtalmiques.

Dans le domaine de la chirurgie dentaire, on a procédé à certaines expériences dans le but de "faire sauter" pratiquement des foyers de carie par application de rayons laser. Totalement indolore, cette technique est intéressante. Malheureusement, elle soulève encore des difficultés considérables, même si l'on utilise un système optique à base de fibres de verre. Cependant, il est un autre domaine où l'emploi du laser semble présenter des possibilités intéressantes: il s'agit d'appliquer sur la dent, à l'aide d'un rayon laser, certains minéraux, afin d'obtenir un fondant qui s'amalgame de façon homogène avec l'émail dentaire. On pourrait même envisager la possibilité de disséquer des dents à l'aide d'un laser. La solution de ces divers problèmes nécessitera cependant des recherches plus poussées.

10. PROBLEMES DE SECURITE POSES PAR LE LASER

Pour établir des normes de sécurité relatives à l'emploi du laser, il importe avant tout de déterminer les niveaux d'énergie susceptibles de provoquer des lésions "seuil" de la rétine. Or, cette détermination soulève quelques difficultés, car nous ne connaissons pas avec certitude les critères à appliquer dans l'évaluation d'une lésion rétinienne. Le terme "lésion seuil" a été défini différemment suivant les chercheurs; de ce fait, il est assez difficile de comparer les résultats expérimentaux. On appelle normalement "lésion seuil" la plus petite lésion qui soit détectable à l'ophtalmoscope. Il nous faut cependant considérer les points suivants: l'ophtalmoscope grossit au maximum 16 fois; la lampe à fente, associée à des systèmes optiques auxiliaires, donne du fond d'oeil une image grossie 40 fois. Si l'on utilise de la fluorescéine, on peut atteindre un seuil encore plus faible et détecter une fragilité vasculaire potentielle. Une lésion minimale, détectable morphologiquement, peut être complètement réversible, alors qu'une lésion fonctionnelle que l'on ne peut détecter à l'ophtalmoscope peut parfois entraîner une atteinte permanente. Pour la valeur seuil, la rétine peut avoir une réaction extrêmement forte et qui n'est pas nécessairement linéaire par rapport à la dose de radiation. Même si la surface de la lésion est réduite, l'oedème qui l'entoure peut être beaucoup plus étendu. On ne peut malheureusement pas procéder à des recherches fonctionnelles sur les animaux, puisque ces derniers n'ont pas la possibilité de nous renseigner. Le seuil, tel qu'il est déterminé à l'aide de l'ophtalmoscope, peut encore être abaissé si l'on effectue des examens histologiques; cependant, il est rarement possible d'établir un rapport entre le trouble fonctionnel réel et les modifications pathologiques et histologiques. En procédant à des examens histochimiques des inactivations enzymatiques, on peut encore abaisser le seuil ophtalmologique de 10 à 15%. Pour déterminer les seuils, on a également recours à l'électrorétinogramme (ERG), utilisé pour connaître la réaction électrique de la rétine à certains stimuli lumineux. Des énergies lumineuses de 50% inférieures aux énergies seuil déterminées par l'ophtalmoscope créent des modifications permanentes de l'ERG. En outre, il faut tenir compte du fait que les seuils oculaires varient suivant les espèces animales considérées. Ces études ne peuvent être menées sur l'homme, et les yeux humains dont il faut procéder à l'ablation pour d'autres raisons ne sont pas facilement disponibles pour ce type d'examen. En outre, il conviendrait d'être très prudent dans l'interprétation de résultats obtenus à la suite d'examens portant sur des yeux souffrant d'une affection primaire. En nous basant sur le très petit nombre d'examens effectués, nous pouvons cependant conclure que les seuils de lésion de la rétine sont plus élevés chez l'être humain que chez le lapin, et que ce fait peut être considéré comme un certain facteur de sécurité.

Le terme "seuil" semble déterminer le niveau d'énergie susceptible de provoquer une lésion dans 50% des cas.

A l'aide d'arcs à xénon et à carbone fonctionnant par impulsions, Ham et ses collaborateurs ont déterminé les seuils pour lesquels on a, chez le lapin, une coagulation rétinienne à peine détectable. Indépendamment de la surface de la région exposée, les énergies seuil sont d'environ $0,7 \text{ J/cm}^2$ avec un temps d'exposition décroissant. On a également découvert que, pour des énergies identiques, l'effet d'un laser à rubis est le même que celui d'un arc à xénon en ce qui concerne l'énergie seuil. Si l'on réduit le temps d'exposition, l'énergie seuil diminue également. Pour un laser à rubis à déclenchement dont la durée d'impulsion est de 28,5 nanosecondes, l'énergie seuil décroît jusqu'à ne plus atteindre que $0,07 \text{ J/cm}^2$. Kotiao et ses collaborateurs découvrirent même que, en utilisant la même énergie d'irradiation, il faut à un laser à rubis à déclenchement (durée d'impulsion: 80 nanosecondes) environ 40 fois moins d'énergie pour provoquer la formation d'une lésion qu'à un laser pulsé ordinaire dont la durée d'impulsion est de 0,5 millisecondes.

Alors que les premiers principes de sécurité furent initialement dictés par le bon sens, on a pu ensuite à titre d'essai, établir des règles de sécurité grâce à la poursuite des recherches biologiques et physiques. Le fait que la valeur maximum admissible d'une irradiation directe de l'oeil est sujette à des changements constants prouve qu'elle ne peut en aucun cas faire l'objet de règlements définitifs. Bien qu'il soit relativement facile de définir des règles de sécurité régissant le maniement des instruments à laser en laboratoire et en usine, la tâche devient très ardue lorsqu'il s'agit d'établir des règles de sécurité relatives à la manipulation de ces instruments en dehors de toute installation

spécifique. Dans un établissement industriel, le nombre de personnes susceptibles d'être en contact avec des rayons laser est toujours limité. Dans ces cas, les vérifications ophtalmologiques nécessaires ne présentent pas de difficultés. Comment, par contre, procéder régulièrement à ces vérifications sur des populations étendues? Voilà qui nous semble beaucoup moins réalisable.

Il est impératif que toutes les personnes susceptibles d'être en contact avec des rayons laser au cours de leurs occupations professionnelles soient soumises à un examen ophtalmologique au début et à la fin de leur activité. En outre, il est souhaitable que ces vérifications soient renouvelées tous les six mois pendant la durée de leur emploi. Il conviendrait d'examiner à fond les points suivants:

- (1) faculté visuelle sans correction, ou, si nécessaire, avec correction de myopie ou d'hypermétropie;
- (2) champ visuel central et périphérique, des deux côtés; il conviendrait également d'examiner le centre de la rétine à l'aide des tables d'Amsler pour y déceler les très petites lésions;
- (3) mobilité et réaction de la pupille;
- (4) vérification de la vision des couleurs;
- (5) examen des parties antérieures de l'oeil avec pupille rétrécie, et en particulier du cristallin avec mydriase;
- (6) examen du fond d'oeil à l'ophtalmoscope (mydriase);
- (7) mesure de la pression intraoculaire.

Ces examens doivent être effectués avec une minutie extrême; toute les modifications pathologiques doivent être soigneusement spécifiées. Si nécessaire, les lésions du cristallin ou du fond d'oeil devront être photographiées. En effet, de nombreuses modifications pathologiques peuvent être confondues avec des lésions oculaires dues à la lumière, ainsi les cicatrices chorioretiniennes, qui ont cependant une origine différente. Les conséquences légales en découlant, par exemple demandes d'indemnités ou de pensions, seraient précaires. D'autre part, une petite perforation de la rétine provoquée par un rayon laser et susceptible d'entraîner par la suite un décollement de la rétine peut très bien passer inaperçue.

Les experts expriment des points de vue différents quant à l'opportunité d'entreprendre des examens méthodiques d'aptitude à la manipulation d'instruments à laser. Nous pensons, quant à nous qu'il serait très utile de définir des principes d'aptitude. Il faut éviter d'exposer aux dangers des rayons laser les personnes souffrant de défauts considérables de la vision, d'affections oculaires chroniques ou aiguës, ou de certaines modifications (par exemple, dégradation unilatérale de la macula, cicatrices chorioretiniennes, graves défauts des champs visuels); on risquerait en effet d'aggraver l'état d'un oeil malade ou de détériorer le seul oeil indemne.

Il va sans dire qu'il est impératif de prendre certaines mesures de précaution lorsqu'on utilise un équipement à laser dans une pièce pour éviter d'exposer toute personne à un rayon direct ou réfléchi, ou même à un rayon réfléchi de manière diffuse.

Une incertitude considérable demeure cependant en ce qui concerne le point suivant: il est souvent recommandé de n'utiliser un laser que dans une pièce aux murs noirs ou foncés susceptibles d'absorber un rayon laser égaré. Or il nous semble que cette solution soit à déconseiller. En effet, si la pièce est trop sombre, ce qui est le cas lorsqu'on a des murs peints en noir ou des écrans noirs, l'oeil court un risque plus grand d'être lésé par un rayon laser, puisque la pupille se dilate dans l'obscurité. Une pièce où l'on utilise un laser doit bénéficier d'un éclairage minimum d'environ 200 lux. Il est évident que les personnes soumises, pour des raisons thérapeutiques ou diagnostiques, à une médication qui a pour effet de dilater les pupilles, ne doivent pas se servir d'un laser pendant toute la durée de la mydriase. Cette observation s'applique également à toute personne souffrant d'une dilatation pathologique de la pupille (par exemple à la suite d'un traumatisme du globe oculaire, etc.).

Il est impératif que toute personne susceptible d'être exposée aux rayons laser porte des lunettes de protection pendant son travail. Ceci n'est pas seulement valable pour les travaux impliquant l'utilisation de lasers à l'intérieur d'un laboratoire ou d'une usine, mais également pour les exercices militaires en campagne. Il est important, en outre, d'avoir recours à des filtres protecteurs valables pour les longueurs d'onde respectives des différents lasers. En cas d'émission simultanée de rayons laser de longueurs d'onde différentes, seuls sont considérés comme efficaces les filtres capables de protéger contre tous les rayons à la fois. Cependant, malgré le port de lunettes protectrices, il est dangereux de regarder directement un rayon laser. Il va de soi qu'on utilise des filtres protecteurs présentant une densité optique suffisante. Si, d'autre part, on emploie ces filtres en temps de guerre, il faut veiller à ce que leur transparence soit presque de 100% sans quoi leur utilisation nocturne serait impossible.

REPORT DOCUMENTATION PAGE															
1. Recipient's Reference	2. Originator's Reference AGARD-AR-84	3. Further Reference ISBN 92-835-0168-3	4. Security Classification of Document UNCLASSIFIED												
5. Originator	Advisory Group for Aerospace Research and Development North Atlantic Treaty Organization 7 rue Ancelle, 92200 Neuilly sur Seine, France														
6. Title	BIOPHYSICAL PROBLEMS IN AEROSPACE MEDICINE PROBLEMES BIOPHYSIQUES PARTICULIERS DE LA MEDECINE AEROSPATIALE														
7. Presented at															
8. Author(s)	Various		9. Date December 1976												
10. Author's Address	Various		11. Pages 174												
12. Distribution Statement	This document is distributed in accordance with AGARD policies and regulations, which are outlined on the Outside Back Covers of all AGARD publications.														
13. Keywords/Descriptors	<table border="0"> <tr> <td>Aerospace medicine</td> <td>Lasers</td> <td>Altitude</td> </tr> <tr> <td>Biophysics</td> <td>Electromagnetic environments</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Radiobiology</td> <td>Military personnel</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Radiation effects</td> <td>Cosmic rays</td> <td></td> </tr> </table>			Aerospace medicine	Lasers	Altitude	Biophysics	Electromagnetic environments		Radiobiology	Military personnel		Radiation effects	Cosmic rays	
Aerospace medicine	Lasers	Altitude													
Biophysics	Electromagnetic environments														
Radiobiology	Military personnel														
Radiation effects	Cosmic rays														
14. Abstract	<p> This publication contains papers prepared by an Aerospace Medical Panel Working Group. The five papers are as follows: Cosmic Radiation Doses at Aircraft Altitudes; Biological Studies of Cosmic Rays; Radiobiological Problems of High Altitude Flights; Non-Ionising Electromagnetic Fields, Environmental Factors in Relation to Military Personnel; and Medical Aspects of Lasers and Laser Safety Problems. </p> <hr/> <p> Les cinq communications constituant la présente publication ont été préparées par un Groupe de Travail du Panel de la Médecine Aérospatiale de l'AGARD. Les titres des communications sont respectivement: Doses dues aux Rayonnements Cosmiques aux Altitudes Inférieures à 25 km; Etudes Biologiques des Rayonnements Cosmiques; Problèmes Radiobiologiques Posés par les Vols à Haute Altitude (Inférieure à 25 km); Les Champs Electromagnetiques Non-Ionisants. Facteurs d'Environnement en Milieu Militaire; et Les Lasers — Aspects Médicaux et Problèmes de Sécurité. </p>														

AGARD Advisory Report No.84 Advisory Group for Aerospace Research and Development, NATO BIOPHYSICAL PROBLEMS IN AEROSPACE MEDICINE - PROBLEMES BIOPHYSIQUES PARTICULIERS DE LA MEDECINE AEROSPATIALE Published December 1976 174 pages	AGARD-AR-84 Aerospace medicine Biophysics Radiobiology Radiation effects Lasers	AGARD Advisory Report No.84 Advisory Group for Aerospace Research and Development, NATO BIOPHYSICAL PROBLEMS IN AEROSPACE MEDICINE - PROBLEMES BIOPHYSIQUES PARTICULIERS DE LA MEDECINE AEROSPATIALE Published December 1976 174 pages	AGARD-AR-84 Aerospace medicine Biophysics Radiobiology Radiation effects Lasers
This publication contains papers prepared by an Aerospace Medical Panel Working Group. The five papers are as follows: Cosmic Radiation Doses at Aircraft Altitudes; Biological Studies of Cosmic Rays; Radiobiological Problems of High Altitude Flights; Non-Ionising Electromagnetic Fields, Environmental Factors in Relation to Military Personnel; and Medical Aspects of Lasers and Laser Safety Problems. P.T.O.	Electromagnetic environments Military personnel Cosmic rays Altitude	This publication contains papers prepared by an Aerospace Medical Panel Working Group. The five papers are as follows: Cosmic Radiation Doses at Aircraft Altitudes; Biological Studies of Cosmic Rays; Radiobiological Problems of High Altitude Flights; Non-Ionising Electromagnetic Fields, Environmental Factors in Relation to Military Personnel; and Medical Aspects of Lasers and Laser Safety Problems. P.T.O.	Electromagnetic environments Military personnel Cosmic rays Altitude
AGARD Advisory Report No.84 Advisory Group for Aerospace Research and Development, NATO BIOPHYSICAL PROBLEMS IN AEROSPACE MEDICINE - PROBLEMES BIOPHYSIQUES PARTICULIERS DE LA MEDECINE AEROSPATIALE Published December 1976 174 pages This publication contains papers prepared by an Aerospace Medical Panel Working Group. The five papers are as follows: Cosmic Radiation Doses at Aircraft Altitudes; Biological Studies of Cosmic Rays; Radiobiological Problems of High Altitude Flights; Non-Ionising Electromagnetic Fields, Environmental Factors in Relation to Military Personnel; and Medical Aspects of Lasers and Laser Safety Problems. P.T.O.	AGARD-AR-84 Aerospace medicine Biophysics Radiobiology Radiation effects Lasers Electromagnetic environments Military personnel Cosmic rays Altitude	AGARD Advisory Report No.84 Advisory Group for Aerospace Research and Development, NATO BIOPHYSICAL PROBLEMS IN AEROSPACE MEDICINE - PROBLEMES BIOPHYSIQUES PARTICULIERS DE LA MEDECINE AEROSPATIALE Published December 1976 174 pages This publication contains papers prepared by an Aerospace Medical Panel Working Group. The five papers are as follows: Cosmic Radiation Doses at Aircraft Altitudes; Biological Studies of Cosmic Rays; Radiobiological Problems of High Altitude Flights; Non-Ionising Electromagnetic Fields, Environmental Factors in Relation to Military Personnel; and Medical Aspects of Lasers and Laser Safety Problems. P.T.O.	AGARD-AR-84 Aerospace medicine Biophysics Radiobiology Radiation effects Lasers Electromagnetic environments Military personnel Cosmic rays Altitude

<p>Les cinq communications constituant la présente publication on été préparées par un Groupe de Travail du Panel de la Médecine Aéropatiale de l'AGARD. Les titres des communications sont respectivement: Doses dues aux Rayonnements Cosmiques aux Altitudes Inférieures à 25 km; Etudes Biologiques des Rayonnements Cosmiques; Problèmes Radiobiologiques Posés par les Vols à Haute Altitude (Inférieure à 25 km); Les Champs Electromagnétiques Non-Ionisants. Facteurs d'Environnement en Milieu Militaire; et Les Lasers – Aspects Médicaux et Problèmes de Sécurité.</p> <p>ISBN 92-835-0168-3</p>	<p>Les cinq communications constituant la présente publication on été préparées par un Groupe de Travail du Panel de la Médecine Aéropatiale de l'AGARD. Les titres des communications sont respectivement: Doses dues aux Rayonnements Cosmiques aux Altitudes Inférieures à 25 km; Etudes Biologiques des Rayonnements Cosmiques; Problèmes Radiobiologiques Posés par les Vols à Haute Altitude (Inférieure à 25 km); Les Champs Electromagnétiques Non-Ionisants. Facteurs d'Environnement en Milieu Militaire; et Les Lasers – Aspects Médicaux et Problèmes de Sécurité.</p> <p>ISBN 92-835-0168-3</p>
<p>Les cinq communications constituant la présente publication on été préparées par un Groupe de Travail du Panel de la Médecine Aéropatiale de l'AGARD. Les titres des communications sont respectivement: Doses dues aux Rayonnements Cosmiques aux Altitudes Inférieures à 25 km; Etudes Biologiques des Rayonnements Cosmiques; Problèmes Radiobiologiques Posés par les Vols à Haute Altitude (Inférieure à 25 km); Les Champs Electromagnétiques Non-Ionisants. Facteurs d'Environnement en Milieu Militaire; et Les Lasers – Aspects Médicaux et Problèmes de Sécurité.</p> <p>ISBN 92-835-0168-3</p>	<p>Les cinq communications constituant la présente publication on été préparées par un Groupe de Travail du Panel de la Médecine Aéropatiale de l'AGARD. Les titres des communications sont respectivement: Doses dues aux Rayonnements Cosmiques aux Altitudes Inférieures à 25 km; Etudes Biologiques des Rayonnements Cosmiques; Problèmes Radiobiologiques Posés par les Vols à Haute Altitude (Inférieure à 25 km); Les Champs Electromagnétiques Non-Ionisants. Facteurs d'Environnement en Milieu Militaire; et Les Lasers – Aspects Médicaux et Problèmes de Sécurité.</p> <p>ISBN 92-835-0168-3</p>